

Aus dem Med. Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Geschäftsführende Direktorin: Prof. Dr. med. dent. H.M. Korbmacher-Steiner

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

**Untersuchung der mechanischen Beständigkeit von
Glatflächenversiegeln während der Multibracketbehandlung
- eine in vitro Studie-**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Jonas Matthias Derschang
aus St. Ingbert
Marburg, 2020

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg
am: 23.11.2020

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan i. V der Prodekan: Prof. Dr. R. Müller

Referent: Prof. Dr. Korbmacher-Steiner

1. Korreferent: Prof. Dr. Lotzmann

-Für meine Familie-

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Literaturübersicht	7
2.1 Zahnschmelz	7
2.2 Kariesentwicklung	8
2.3 Prophylaxemaßnahmen zur Vorbeugung von Demineralisationen	10
2.3.1 Compliance-abhängige Prophylaxemaßnahmen	10
2.3.1.1 Häusliche Mundhygiene	10
2.3.1.2 Professionelle Reinigung	11
2.3.2 Compliance-unabhängige Prophylaxemaßnahmen	11
2.3.2.1 Applikation fluoridhaltiger Lacke	11
2.3.2.2 Applikation von bakteriostatischen bzw. -lytischen Substanzen	12
2.3.2.3 Applikation von Ozon	12
2.3.2.4 Behandlung mit lingualen Apparaturen und Alignerschienen	13
2.3.2.5 Verwendung fluoridhaltiger Haftmittel	13
2.3.2.6 Applikation von Glattflächenversiegelungen	14
3. Ziel der Arbeit	18
4. Material und Methode	20
4.1 Auswahl der Zähne und chronologischer Versuchsablauf	20
4.2 Herstellung der Versuchsproben	23
4.2.1 Herstellung der Kontrollproben (Gruppe A)	25
4.2.2. Herstellung der Pro Seal®, Light Bond™-, Clearfil™ Protect Bond-, und Ortho Solo™ Proben (Gruppen B, C, D, E)	26
4.2.3 Herstellung der Protecto® CaF ₂ Nano Proben (Gruppe F)	26
4.3 Kausimulation	27
4.4 Künstliche Alterung	28
4.5 Pulver-Wasserstrahl Reinigung (PWS)	30
4.6 Putzsimulation	32
4.7 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (REM) und energiedispersive Röntgenspektroskopie (REM-EDX)	33
4.8 Statistische Auswertung	33
5. Ergebnisse	35
5.1 Energiedispersive Röntgenspektroskopie - Aufnahmen (REM-EDX)	35
5.1.1 Hypothese 1	35
5.1.2 Hypothese 2	36

5.1.3 Hypothese 3	37
5.2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM)	38
5.2.1 Gemeinsame Beobachtungen aller Gruppen	38
5.2.2 Gruppe A (Kontrolle)	38
5.2.3 Gruppe B (Pro Seal®)	40
5.2.6 Gruppe C (Light Bond™)	42
5.2.7 Gruppe D (Clearfil™ Protect Bond)	44
5.2.8 Gruppe E (Ortho Solo™)	46
5.2.9 Gruppe F (Protecto® CaF ₂ Nano)	48
5.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (REM) einer Pro Seal®-Lackoberfläche nach isolierter Pulver-Wasserstrahl Reinigung (PWS)	50
6. Diskussion	51
6.1 Relevanz der Studie	51
6.2 Verwendete Materialien und Zeitraum der Untersuchung	51
6.3 Belastungssimulation	55
6.3.1 Künstliche Alterung	55
6.3.2 Kausimulation	56
6.3.3 Putzsimulation	56
6.3.4 Pulver-Wasserstrahl Reinigung	57
6.4 REM und REM-EDX	58
6.5 Diskussion der Ergebnisse	59
6.5.1 Hypothese 1	59
6.5.2 Hypothese 2	61
6.2.3 Hypothese 3	62
6.6 Klinische Relevanz und Ausblick	69
7. Zusammenfassung	70
8. Summary	72
9. Literaturverzeichnis	73
10. Anhang	87
10.1 Tabellenverzeichnis	87
10.2 Abbildungsverzeichnis	87
10.3. Tabellarischer Lebenslauf	90
10.4 Verzeichnis der akademischen Lehrer	90
10.5 Ehrenwörtliche Erklärung	90
10.6 Danksagung	90

1. Einleitung

Während der kieferorthopädischen Behandlung mit festsitzenden Apparaturen entsteht eine vergrößerte Retentionsfläche für Speisereste und bakteriellen Biofilm, welche die Mundhygienebedingungen erschweren und die Kariesaktivität des Patienten erhöhen können [8]. Frühe Formen der Zahnschmelzdemineralisation treten klinisch als sogenannte white spot Läsionen (WSL) in Erscheinung [7,40,76,115]. Diese können bereits nach wenigen Wochen Behandlungszeit auftreten [124,127]. Hierbei sind besonders die Oberkieferfrontzähne betroffen [66]. Bezüglich der Inzidenz von Initialläsionen finden sich weit gestreute Literaturwerte zwischen 15% und 85% [115]. Dies mag in der uneinheitlichen Verwendung des Begriffes Inzidenz begründet liegen [93]: So kann von einer zahnbezogenen Inzidenz gesprochen werden, welche den Anteil der während der Behandlung neu betroffenen Zähne beschreibt, als auch von der patientenbezogenen Inzidenz. Diese drückt den Anteil von Patienten aus, welche mindestens eine neue Läsion während der Therapie erworben haben [93]. Zudem erklären unterschiedliche Studierenerhebungsverfahren und die Unterschiede bezüglich vorbestehender Kariesläsionen, lokale Fluoridversorgungen sowie Ernährungs- bzw. Mundhygienegewohnheiten die Abweichungen der Literaturangaben [102]. Insbesondere heranwachsende Patienten, somit die Altersgruppe der kieferorthopädischen Hauptbehandlung, zeigen eine erhöhte Anfälligkeit für Demineralisationen [32]. Die therapieinduzierte, patientenbezogene Inzidenz liegt hier bei 23-79% [48,90,93,132]. Da durch die Verbesserung der dentofazialen Ästhetik auch Lebensqualität und Selbstwahrnehmung des Patienten gesteigert werden [33], sind derartige Nebeneffekte als Minderung des kieferorthopädischen Behandlungserfolges anzusehen. Die Glatflächenversiegelung stellt eine mögliche Präventivmaßnahme dar, bei der die Zahnschmelzoberfläche vor dem Bekleben mit Brackets mit einem Kunststoffpolymer überzogen wird, welches eine Schutzbarriere gegenüber kariösen Prozessen darstellen soll [80]. Die Ursprünge dieser Technik finden sich in der erstmals von Buonocore im Jahre 1955 beschriebenen Säureätztechnik [27], bei der durch eine Säurekonditionierung die mikroskopische Zahnschmelzoberfläche derart vergrößert wird, dass ein Haftverbund zwischen Zahnschmelz und Kunststoffadhäsiv erreicht wird [69].

2. Literaturübersicht

2.1 Zahnschmelz

Der Zahnschmelz schützt als äußerste Struktur des Zahnes das darunter befindliche Dentin und die zentral liegende Pulpa vor exogenen Noxen [78]. Im Bereich der Okklusionsflächen ist er bis zu 2,5 mm dick und stellt mit einer Härte von 250-360 KHN (Knoop hardness number) die härteste und zugleich sprödeste Substanz des menschlichen Körpers dar [136]. Tabelle 1 zeigt den chemischen Aufbau des humanen Zahnschmelzes. Calcium und Phosphor liegen in kristalliner Form als Apatitverbindung ($\text{Ca}_5[\text{OH}(\text{PO}_4)_3]$) [144] vor, welche als Hydroxylapatit bezeichnet wird [78]. Durch Substitutionsreaktionen, bei denen Hydroxylgruppen durch Fluoridionen ausgetauscht werden, kann Fluorapatit gebildet werden, welches eine stabilere Kristallgitterstruktur besitzt und gegenüber Säuren weniger löslich ist als das Hydroxylapatit [138].

Die Schmelzkristalle haben im ausgereiften Zustand eine leicht abgeflachte, annähernd hexagonale Stäbchenform. Etwa 100 dieser Apatitkristalle sind in einem Verband zu einem sogenannten Schmelzprisma zusammengesetzt [136]. Die superfiziellen 20-80 µm tiefen Areale des Schmelzes sind prismenfrei [98].

Die einzelnen Verbände sind durch einen schmalen, interkristallinen Raum voneinander separiert. Dieser, auch als Mikropore bezeichnete Raum, enthält Wasser sowie eine organische Matrix und stellt ein filigranes Diffusionsnetzwerk dar [52]. Durch die periodische Schmelzbildung entstehen Wachstumslinien auf der Zahnoberfläche, die als Retzius Streifen bezeichnet werden und durch dazwischenliegende Vertiefungen, sog. Perikymatien voneinander getrennt werden [117].

Tabelle 1: Chemischer Aufbau des Zahnschmelzes [24]

Anorganische Materie (95 Gew. %)	<ul style="list-style-type: none">• Calcium• Magnesium• Phosphor• Carbonat• Natrium• 40 versch. Spurenelemente
Organische Materie (1 Gew. %)	<ul style="list-style-type: none">• Proteine• Citrat• Spuren von Kohlenhydraten• Lipide• Laktat
Wasser (4 Gew. %)	<ul style="list-style-type: none">• Als Hydratschale um die Apatitkristalle• Frei in der organischen Substanz

2.2 Kariesentwicklung

Bei der Pathogenese der Karies wird von einem multifaktoriellen Geschehen ausgegangen, welches neben dem Zahn als Wirt das gleichzeitige Vorhandensein kariesinduzierender Bakterien in der dentalen Plaque sowie ein Nährsubstrat, im speziellen in Form von niedermolekularen Kohlenhydraten, bedingt [74].

Diese Prozesse wurden erstmalig von Miller im Jahre 1899 [114] in der sogenannten chemoparasitären Theorie beschrieben, welche bis heute in modifizierter Form Gültigkeit hat [78]. Hierbei wird gemäß den Ausführungen von Hellwig et al. [78] davon ausgegangen, dass spezielle, im dentalen Biofilm befindliche Mikroorganismen bei Zuführung von ausreichendem Substrat organische Säuren bilden, welche die Kristallgitterstruktur der Zahnhartsubstanz durch Herauslösen von Calcium- und Phosphationen auflösen. Weitere ökologische Faktoren wie Fließrate, Zusammensetzung und Pufferkapazität des Speichels, Frequenz des Zuckerkonsums oder sozioökonomisch-verhaltensbezogene Faktoren können den Prozess zudem beeinflussen [74].

Die Ausprägungen der Erkrankung reichen dabei von ausschließlich mikroskopisch erkennbaren Veränderungen, über klinisch diagnostizierbare white spot Läsionen, bis hin zur totalen Zerstörung der Zahnhartsubstanz [74].

Detailliert betrachtet vollzieht sich dieser Vorgang in mehreren Abschnitten: Auf einer

gereinigten Zahnschmelzoberfläche bildet sich binnen kurzer Zeit ein sogenanntes „acquired pellicle“ aus einem etwa 0,1-1µm dicken, azellulären Film von Glykoproteinen des Speichels. Die Bindung zum Apatit des Schmelzes entsteht durch die eigene Ladung der Pellikelproteine, welche elektrostatisch an die Calcium- und Phosphatgruppen des Apatits binden [78]. An dieser, auch Biofilm genannten, Membran findet binnen weniger Stunden eine Adhäsion bakterieller Mikroorganismen statt [24]. Es erfolgt zunächst eine Primärbesiedlung durch vornehmlich kokkenförmige Gattungen, wie u.a. Streptokokkus sangius und Actinomyceten.

Hellwig et al. [78] beschreiben eine Volumenzunahme des Biofilmes im Rahmen einer sekundären Besiedlung und einer Bindung weiterer Bakterien durch Adhäsions- und Kohäsionseffekte. Der ausgereifte Biofilm besteht zu ca. 60-70 Vol.-% aus Bakterien, die in eine extrazelluläre Polysaccharidschicht eingebettet sind [78]. Wird diese nicht mittels Zahnbürste mechanisch entfernt, nimmt sie weiter an Volumen zu [65]. Der reifende Biofilm entwickelt einen zunehmend anaeroben Charakter. Bakterien, insbesondere Streptokokkus mutans, Laktobazillen und Actinomyceten produzieren Säuren [20]. Dazu metabolisieren sie die niedermolekularen Kohlenhydrate aus der zugeführten Nahrung. Organischen Säuren geben Wasserstoffionen ab, welche zunächst durch den Phosphat- und Bicarbonatpuffer des Speichels neutralisiert werden [78]. Bei weiterem Absinken des pH-Wertes unterhalb eines kritischen Wertes, welcher nach Marsh et al. [107] bei 5,5 liegt, gehen die Wasserstoffionen mit den Phosphatgruppen des Schmelzes eine Bindung ein. Dabei werden zugleich Calciumionen freigegeben und so das Apatitgitter schrittweise aufgelöst [55].

Bei Patienten mit kieferorthopädischen Behandlungsapparaturen bieten Brackets, Bänder oder Drahtelemente eine deutlich vergrößerte Retentionsfläche für Speisereste und Plaque [40,66]. Besonders in direkter Umgebung des Brackets, im Bereich zwischen Bracket und Zahnfleischsaum sowie direkt unterhalb des Bogens sammelt sich bakteriell besiedelter Biofilm [66,70,71,76,88,116]. Solche durch eine Apparatur künstlich geschaffenen Flächen werden als iatrogene Faktoren bezeichnet.

Innerhalb der somit vermehrt stattfindenden bakteriellen Kolonisation vollzieht sich eine Veränderung der oralen Mikroflora [66]: Die Anzahl von Streptokokkus mutans, Laktobazillen, Spirochäten und beweglichen Stäbchen ist erhöht [19,37,82].

Rosenbloom et al. [134] stellten fest, dass während der aktiven kieferorthopädischen Behandlungsphase eine bis zu vierfach höhere Konzentration an Streptokokkus mutans gemessen werden konnte als vor der Eingliederung der Apparatur. Die zudem erniedrigten pH-Werte können somit eine beschleunigte Entwicklung von Demineralisationserscheinungen begünstigen [5,125].

2.3 Prophylaxemaßnahmen zur Vorbeugung von Demineralisationen

2.3.1 Compliance-abhängige Prophylaxemaßnahmen

Vor Aufnahme einer kieferorthopädischen Therapie sollte der Patient über das erhöhte Risiko der Kariesentstehung aufgeklärt werden. Durch eingehende Instruktion und stetige Remotivation sollte er zu guter Mitarbeit (Compliance) bewegt werden. Das Ziel ist hierbei die Etablierung einer routinierten, eigenständig durchgeführten Mundhygienesystematik während der gesamten Therapiedauer [75].

2.3.1.1 Häusliche Mundhygiene

Die primäre Maßnahme zum Erhalt gesunder Zahnhartsubstanz und somit Vorbeugung neuer kariöser Veränderungen stellt die vollständige Entfernung des bakteriellen Biofilmes dar [16]. Diese erfolgt durch den Patienten mit Zahnbürste, Zahncreme und Hilfsmitteln wie Zahnseide oder Interdentalraumbürsten [95].

Studien zur Putzdauer und Effizienz zeigten, dass ein Großteil der Gesamtzahnfläche nicht von bakteriellem Biofilm befreit wurde und die Putzdauer häufig weniger als eine Minute betrug [68,122]. Einige Bereiche, vor allem der Bereich zwischen Zahnfleischsaum und Bracket wurden mittels Zahnbürste häufig nicht erfasst [95]. Weiterhin empfehlen zahlreiche Autoren die Anwendung von interdentalen Reinigungshilfen [41,86,95]. Dabei konnten keine Unterschiede in der Reinigungsleistung unterschiedlicher Arten der Zahnseide wie Multifloss, Superfloss oder herkömmliche Zahnseide in Studien an Patienten mit festsitzenden Apparaturen festgestellt werden. Trotz mehrmaliger Instruktion unterblieb zudem die regelmäßige Anwendung [42].

Einige Studien konnten die Überlegenheit elektrischer Zahnbürsten bezüglich der Vermeidung von Gingivitiden und Entkalkungen gegenüber Handzahnbürsten feststellen [21,151]. Andere Autoren sahen hier keinen Vorteil [79,86,95,146]. Zudem finden sich Untersuchungen, die auf eine herausragende Bedeutung der Fluoridkonzentration der Pflegemittel hinweisen [2,140]: So verglichen

Sonesson et al. [140] in einer klinischen Studie an Patienten mit festsitzenden Apparaturen die Effektivität einer Zahncreme mit regulärem Fluoridgehalt von 1450 ppm mit einer solchen, die einen erhöhten Gehalt von 5000 ppm aufwies. Die Probanden jeder Gruppe wurden instruiert, die jeweils ausgehändigte Zahncreme zweimal täglich anzuwenden. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede in beiden Gruppen: Die Patienten der niedrig dosierten Gruppe entwickelten 26,6% neue white spot Läsionen. In der hochdosierten Gruppe waren es hingegen 18,1%. Die Autoren empfehlen somit die Anwendung hochkonzentrierter Fluoridgele zur häuslichen Zahnpflege während der kieferorthopädischen Therapiedauer [140].

2.3.1.2 Professionelle Reinigung

Zusätzlich zur häuslichen Mundpflege können unterstützend professionelle Reinigungen durchgeführt werden [89,121]. Aufgabe der Behandler ist es, Risikopatienten zu erkennen und diese dann intensivprophylaktisch zu betreuen [75]. Verschiedene Studien zeigen den positiven Effekt der professionellen Zahnreinigung [10,81,92]. So konnte in einem schwedischen Präventivprogramm [10] an 6-9 Jährigen mit professionellen Zahnreinigungen, Applikation von Fluoriden und Fissurenversiegelungen eine Kariesreduktion um 60-80% erreicht werden.

2.3.2 Compliance-unabhängige Prophylaxemaßnahmen

Methoden, die allein auf der Mitarbeit und dem Verständnis der Patienten basieren, stellen sich häufig als nicht dauerhaft erfolgreich dar. So stellten andere Autoren [48] fest, dass trotz regelmäßiger Remotivation 60,9% der Patienten im Rahmen ihrer festsitzenden Therapie neue Demineralisation erworben haben. Da dies auch bei Patienten mit guter Compliance zu beobachten ist, sind Maßnahmen, welche wenig Mitarbeit während der Behandlung voraussetzen, wünschenswert [72,132]. Solche Schutzmaßnahmen können als compliance-unabhängig bezeichnet werden. Hierzu existieren verschiedene Ansätze:

2.3.2.1 Applikation fluoridhaltiger Lacke

Eine häufig durchgeführte Maßnahme während der kieferorthopädischen Therapie ist das wiederholte Auftragen eines Fluoridpräparates in Rahmen der Kontrollsitzen. Diesem werden mehrere antikariogene Wirkweisen zugeschrieben [51]: Es verhindert einerseits die Entstehung von Demineralisationserscheinungen und unterstützt den

Remineralisationsprozess der Apatitkristalle. Die aus diesem Prozess entstehende Oberflächenschicht zeigt zudem große Resistenz gegenüber Säureangriffen. Andererseits hemmen Fluoride das Wachstum kariogener Mikroorganismen durch Herabsetzung der enzymatischen Aktivität der bakteriellen Enolase [51]. In einer Studie [142] an 273 Patienten wurde die Effektivität eines Fluoridpräparates (Fluor Protector, Fa. Ivoclar vivadent, Schaan, Liechtenstein) untersucht: Patienten, welche in 6 wöchigen Intervallen eine Fluoridierung erhielten, zeigten eine Zunahme an demineralisierten Flächen um 7,4%. In der Kontrollgruppe, die ein Placebo erhielt, waren es 25,3%. Die Autoren empfehlen somit die Applikation von Fluoriden durch den Behandler als Routinemaßnahme in der kieferorthopädischen Praxis [142]. Weitere Studien bestätigen die Wirksamkeit dieser Methode [1,38,67].

2.3.2.2 Applikation von bakteriostatischen bzw. -lytischen Substanzen

Als Ergänzung zur Fluoridierung kann die antimikrobielle Substanz Chlorhexidin eingesetzt werden. Diese kann in einer Gelform oder als Spüllösung verwendet werden, wobei die Applikation eines Gels in speziellen Trägern als die wirksamste Methode beschrieben wurde [103]. Chlorhexidin reduziert die Anzahl des säurebildenden Bakteriums *Streptokokkus mutans*, hemmt somit die Säureproduktion in der Plaque und wirkt so einem schnellen pH-Wert Abfall entgegen [47,105]. In Studien bezüglich der Kariesinzidenz zeigten sich unterschiedliche Ergebnisse: Einige Autoren [104] konnten nach Entbänderung in der mit Chlorhexidin behandelten Kieferhälfte statistisch signifikant weniger Entkalkungen feststellen, wohingegen andere Studien [126] keine Verbesserung nach 12 Wochen festsitzender Therapie beschreiben konnten.

2.3.2.3 Applikation von Ozon

Ozon ist ein Gas mit hohem oxidativem Potential, welches direkt auf die zu behandelnde Zahnfläche appliziert wird. Es kann so mit dem Ziel einer Reduktion der Bakterienzahl angewendet werden [123].

Eine im Jahr 2009 veröffentlichte Studie [96] verglich die Wirksamkeit von Ozon zu Chlorhexamed (Cervitec®) / FluorProtector zur Vorbeugung vor neuen Entkalkungen. Dabei zeigte sich Ozon allerdings als weniger wirksam als die medikamentösen Lacke. 3,2% der untersuchten Bereiche zeigten hier neue Initialläsionen. In der Cervitec®/ FluorProtector Gruppe waren es 0,7%.

2.3.2.4 Behandlung mit lingualen Apparaturen und Alignerschienen

In der modernen Kieferorthopädie sind alternativ zu den vestibulären Bracketsystemen auch patientenindividuelle, einen großen Anteil der Zahnfläche bedeckende, Lingualbrackets verfügbar. Bezüglich der Inzidenz von Zahnschmelzdemineralisationen sind die Studienergebnisse positiv: So wurden in einer 2010 durchgeführten Untersuchung [148] 28 Patienten selektiert, die eine individuelle Lingualapparatur in einem Kiefer erhalten haben. Der jeweilige Gegenkiefer wurde im Rahmen des split mouth designs der Studie mit einer vestibulären Multibracketapparatur behandelt. Nach Entbänderung war die Anzahl neuer Demineralisationen bukkal 4,8-fach höher als in dem mit Lingualapparatur behandeltem Gegenkiefer. Zudem konnte mittels quantitativer lichtinduzierter Fluoreszenzmessung (QLF) ein 10,6-fach höherer Fluoreszenzverlust vestibulär und somit eine stärkere Ausprägung der Entkalkung gemessen werden [148].

Weitere Untersuchungen von Wiechmann et al. [150] mit einer größeren Probandenzahl (n= 214) dokumentierten bei 41,9% der Patienten mindestens eine neue white spot Läsion an den Lingualflächen. Damit war die Inzidenz 2,8-fach niedriger als bei vergleichbaren Studien an Probanden mit vestibulären Systemen [132].

Azeem et al. [11] beschäftigten sich mit dem Auftreten neuer white spot Läsionen während der Therapie mit herausnehmbaren Alignerschienen, welche gelegentlich als Alternative zur Multibracketbehandlung in Betracht gezogen werden. Bei 28% der Patienten entwickelte sich mindestens eine neue white spot Läsion nach durchschnittlich 18,11 Monate Behandlungszeit [11]. Weitere Autorengruppen [29] schlussfolgerten ein reduziertes Risiko für die Entwicklung von Demineralisationen bei Behandlung mit herausnehmbaren Alignerschienen im Vergleich zu konventionellen, vestibulären Bracketsystemen.

2.3.2.5 Verwendung fluoridhaltiger Haftmittel

Durch die Entwicklung fluoridhaltiger Bondingmaterialien soll eine konstante Ionenabgabe an den Zahn erreicht werden. Hierbei können Glasionomerzemente (GIZ) eingesetzt werden, welche neben ihrer antikariogenen Eigenschaft weiterhin die Fähigkeit gezeigt haben, Fluoride an ihre Umgebung abgeben zu können [63]. In vitro Studien beschrieben eine herabgesetzte Säurelöslichkeit des Zahnschmelzes beginnend bei einer Fluoridabgabe von

1 ppm [50]. Dabei konnte durch den Einsatz von Glasionomerzement das Auftreten von white spot Läsionen in vitro, im Vergleich mit fluoridhaltigem Composite, um bis zu 50% reduziert werden [38]. Die protektiven Effekte des GIZ beschränken sich allerdings ausschließlich auf das direkte Bracketumfeld, wie andere Untersuchungen [67] gezeigt haben. Zusätzlich ergeben sich klinische Nachteile bei der Anwendung von Glasionomerzement als Bracketbefestigungsmaterial, da dieser einen schwächeren Haftverbund als Composite zum Zahnschmelz eingeht und daraus eine höhere Bracketverlustrate resultiert [63]. Weiterhin sind fluoridhaltige Composite Materialien als Haftmittel verfügbar. Melo et al. [113] verglichen das Fluoridabgabeverhalten von Glasionomerezementen in vitro mit mikro- und nanogefüllten Compositeprodukten. Hierbei zeigte der GIZ signifikant höhere Fluoridabgabewerte als die beiden Vergleichsprodukte. Nach anschließender Exposition der Proben in einem sauren, kariesinduzierenden Testmodell konnten anhand von Mikrohärtetestung bei der Glasionomerzementgruppe die geringsten Demineralisationswerte beobachtet werden [113].

2.3.2.6 Applikation von Glattflächenversiegelungen

Kunststoffe zur Versiegelung von Zahnflächen wurden ursprünglich entwickelt, um Fissuren und schwer zugängliche Bereiche vor vermehrter bakterieller Biofilmbildung zu schützen. Da durch diese Verfahren Demineralisation und tiefere Läsionen häufig verhindert werden konnten, wurde der Anwendungsbereich auf Glattflächen erweitert [18]. Buren et al. [28] stellten eine Überlegenheit dieser Methode bezüglich der Schutzwirkung vor Demineralisation im Vergleich mit der Applikation fluoridhaltiger Lacke fest.

Die als Glattflächenversiegler eingesetzten Composite basieren, vergleichbar mit dentalen Haftvermittlern, ebenfalls auf einer Dimethylacrylat Monomer Basis und können zudem quarzhaltige Füllkörper, Fluoride sowie weitere Monomerarten enthalten [18]. In vorherigen Studien konnte insbesondere der Versiegler Pro Seal® als überlegen beschrieben werden [28,36,94]. Die Anwendung eines solchen mit Füllkörpern hochgefüllten Produktes lieferte bessere Ergebnisse als ein weniger gefülltes Vergleichsprodukt [94].

Bezüglich des Verarbeitungsmodus unterscheidet man lichthärtende Produkte von chemisch härtenden Materialien sowie Kombinationsformen aus beiden, welche als dual härtend bezeichnet werden. Untersuchungen an chemisch härtenden Produkten

zeigten aufgrund der Ausbildung einer nicht-polymerisierten Sauerstoffinhibitionsschicht eine reduzierte Schutzschichtstärke und damit deutliche klinische Nachteile [70]. Mehrmaliges Auftragen verbesserte die Ergebnisse nicht [31]. Weitere Studien bestätigten die Überlegenheit lichthärtender Materialien [87,154].

Neben der Etablierung einer mechanischen Schutzbarriere, sind auch solche Glattflächenversiegler, die durch Fluoridabgabe die Resistenz gegenüber Säureangriffen positiv beeinflussen Gegenstand der aktuellen Forschung. Soliman et al. [139] stellte 2006 fest, dass die Fluoridabgabe von Pro Seal®, einem hochgefüllten, fluoridfreisetzenden Schutzlack von 0,074 ppm/Woche/mm² in der ersten Woche, auf 0,015 ppm/Woche/mm² nach 17 Wochen abfällt. Bei Anwendung einer Mundspüllösung zeigte das Material die Fähigkeit Fluorid wiederaufnehmen und erneut abzugeben zu können (0,354 ppm/Woche/mm²). Durch alleiniges Zähneputzen mit einer fluoridhaltigen Zahncreme konnte dieser Effekt nicht beschrieben werden [139]. Weitere Studien stellten ebenfalls einen raschen Abfall der Fluoridabgabe fest [30,35,67,110,130].

In der Literatur existieren einige wissenschaftliche Untersuchungen, die einen generellen kariesprotektiven Effekt der Glattflächenversiegelung feststellten, wenn versiegelte Zahnproben einem sauren pH Milieu ausgesetzt wurden [15,61,129]. Neben der Untersuchung der Materialien unter sauren, kariogenen Bedingungen wurden keine thermomechanischen Belastungen der Materialien durchgeführt.

Paschos et al. [129] untersuchten die Materialien Pro Seal®, Clearfil™ Protect Bond und Light Bond™ auf eine Schutzwirkung gegenüber Entkalkungen im unmittelbaren Bracketumfeld in vitro. Diese, auch in der vorliegenden Studie untersuchten Produkte, zeigten die Fähigkeit die Tiefe kariöser Läsionen zu reduzieren. Dennoch konnten die Autoren bei der Betrachtung mittels μ -CT bei allen Produkten Demineralisationen feststellen.

Weiterführend haben sich anderen Autorengruppen mit dem Abnutzungs- und Alterungsverhalten von Glattflächenversiegler beschäftigt:

So untersuchten Korbmacher-Steiner et al. [94] die Produkte Pro Seal®, Light Bond™, Ortho Solo™, sowie Seal&Protect® (Fa. Dentsply, Konstanz, DE) nach simulierter Zahnputzabrasion von 12 und 24 Monaten. Anschließend wurden die Zahnproben einer Belastung durch Säureeinwirkung eines Softdrinks (Coca-Cola,

Fa. Coca-Cola, Atlanta, USA) mit pH=3,0 und Thermocycling in 70° C und 5° C temperierten Bädern ausgesetzt. Alle Materialien zeigten bereits ab dem ersten Jahr bei μ -CT-, stereo- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen Materialverluste. Hier zeigte Pro Seal® zu Beginn unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) kleinere Defekte von 30-40 μ m Durchmesser. In diesen lagen Füllpartikel frei. Nach der Abrasionstestung waren diese bis zu 400 μ m groß. Teilweise zeigte sich freiliegender Schmelz.

Light Bond™ zeigte zu Beginn bereits eine unebene Oberfläche. Nach 2 Jahren vergrößerten sich die Defekte von 10-50 μ m auf bis zu 300 μ m. Neben freiliegendem Schmelz konnten zudem erosive Areale festgestellt werden.

Ortho Solo™, welches zunächst eine glatte Oberfläche mit Defekten von 30-100 μ m zeigte, hatte nach simulierten 2 Jahren bis zu 700 μ m Durchmesser große Defekte.

Im Vergleich mit niedrig gefüllten Produkten zeigten sich hochgefüllte, vor allem Pro Seal®, als abrasionsstabiler [94].

Engel et al. [49] testeten den Einfluss von Pulver-Wasser Strahlgeräten (PWS) auf Glattflächenversiegler, wie sie im Rahmen von professionellen Reinigungen verwendet werden: Dabei wurde Pro Seal®, Ortho Solo™ und Seal&Protect™ untersucht. Nach 5 bzw. 10 Sekunden Behandlung mit einem natriumbikarbonathaltigem Strahlmittel, welches im Abstand von 5 mm senkrecht auf einen extrahierten Zahn gestrahlt wurde, wurden die Proben nochmals mit Phosphorsäure konditioniert. Opak erscheinende Bereiche wurden auf Fotografien festgehalten und mittels Adobe Photoshop C3 ausgewertet.

Die Autoren beobachteten, dass nach 5 Sekunden im Mittel noch 69,8% (Ortho Solo™), 70,7% (Seal&Protect™) und 82,8% (Pro Seal®) der Zahnoberfläche von Sealer bedeckt waren. Nach 10 Sekunden betrugen die Werte 54,3% (Ortho Solo™), 59,3% (Seal&Protect™) und 68,9% (Pro Seal®). Ein weniger abrasives, glycinbasiertes Strahlmittel zeigte weniger Schäden (77,1% (Ortho Solo™), 89,7% (Seal&Protect™) und 77,6% (Pro Seal®)), wenngleich auch hier Defekte der Versiegelungsschicht wahrgenommen wurden [49].

Coordes et al. [36] führten weitere Belastungstestungen aus: Dabei wurden verschiedene fluoridabgebende Sealer (Pro Seal®, LightCure/ Alpha-Glaze®, Seal&Protect™) und fluoridhaltige Lacke (Tiefenfluorid®, Protecto®, Fluor Protector®) auf ihre thermomechanische und chemische Belastbarkeit untersucht.

Nach Durchführung von eintausend Thermo- und Bürstenzyklen sowie einwöchiger Lagerung in saurer Umgebung (pH=4,6, T=37°C) wurden die insgesamt 120 Proben lichtmikroskopisch betrachtet. Dabei zeigte sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($p > 0,0001$) zwischen den mit Pro Seal® versiegelten Proben und allen weiteren Produktgruppen. In der Pro Seal® Gruppe wurde keine Demineralisation festgestellt. Die übrigen Materialien wiesen Entkalkungen auf, mit untereinander nicht signifikanten Unterschieden.

In einer Studie von Meller et al. [112] wurde die Oberflächenbeschaffenheit von Pro Seal® nach thermomechanischer Belastung untersucht: Siebzehn extrahierte Prämolaren wurden mit Pro Seal® versiegelt und einem Bracket versehen. Diese wurden daraufhin mit insgesamt 20 000 Zyklen Thermocycling und 15 000 Bürstenzyklen einer in vitro Alterung unterzogen. Nach einer simulierten Testdauer von 6, 12, 18 und 24 Monaten betrachteten Meller et al. die Testproben mittels einer speziellen Fluoreszenz-gestützten Identifikationstechnik (FIT, engl. „Fluorescence-aided Identification Technique“). Dabei wurden die Zahnoberflächen unter einem Lichtmikroskop mit einer Fluoreszenz erzeugenden Lichtquelle von 405 nm Wellenlänge bestrahlt. Da Pro Seal® fluoreszierende Anteile enthält, welche auf humanem Zahnschmelz nicht vorkommen, konnte so die Versiegelung auf ihre Unversehrtheit hin überprüft werden. Dabei stellten Meller et al. eine zeitabhängige, ungleichmäßige Abnahme der versiegelten Bereiche fest. Direkt nach Herstellung der Testproben betrug der Anteil an fluoreszierender Fläche 100%. Während des Versuches bildeten sich Inselförmige Flächen freiliegenden Schmelzes. Diese zeigten sich in unterschiedlicher Ausdehnung: Nach simulierter, zweijähriger Abnutzung waren im Mittel noch 54% der Fläche versiegelt. Die Werte lagen zwischen 79 % Versiegelung und völligem Abtrag des Materials [112].

3. Ziel der Arbeit

Die Glattflächenversiegelung stellt ein klinisches Vorgehen dar, bei dem durch die Herstellung eines Haftverbundes zwischen der Zahnschmelzoberfläche und eines Sealers eine Schutzbarriere gegenüber kariogenen Prozessen gebildet wird. Hierbei werden verschiedene Produkte angeboten: Es existieren Produkte, welche einen hohen Anteil an Quarzfüllkörpern aufweisen und ausschließlich zur Versiegelung von Glattflächen konzipiert sind, wie das in der Studie untersuchte Pro Seal®.

Produkte wie Light Bond™ sind kieferorthopädische Haftvermittler, die ursprünglich zum Befestigen von Brackets auf der Zahnoberfläche dienen, aber klinisch auch als Glattflächenversiegler eingesetzt werden.

Weiterhin existieren Haftvermittler, die mithilfe spezieller Zusätze bakteriolytische Eigenschaften aufweisen sollen (Clearfil™ Protect Bond) und solche, die laut Hersteller Glattflächenversiegler und Haftvermittler in einem darstellen (Ortho Solo™). Schließlich sind auch Materialien erhältlich, die keinen direkten Haftverbund mit dem Zahnschmelz eingehen, sondern die Schutzwirkung durch Umwandlung von Hydroxylapatit in Fluorapatit, und damit eine Herabsetzung der Säurelöslichkeit erzeugen (Protecto® CaF₂ Nano).

Bisher durchgeführte Studien beschäftigten sich häufig ausschließlich mit der Applikation der Produkte und anschließender Testung in kariogener Umgebung [15,61,129]. Andere Forschungsgruppen prüften darüber hinaus bereits den Einfluss einzelner thermomechanischer Belastungen auf die Versiegler, wie den Einfluss der Zahnputzabrasion [28], sowie diese im Zusammenhang mit künstlicher Materialalterung durch Temperaturwechselbäder [36,94] oder den Einfluss professioneller Reinigungen mit Pulver-Wasserstrahlgeräten [49].

Die vorliegende Arbeit schließt vorhandene Forschungslücken durch eine umfassende Untersuchung der mechanischen Beständigkeit verschiedener Glattflächenversiegler in vitro. Dabei soll der Einfluss der täglichen Zahnputzabrasion, der mechanischen Kaubelastung mit den intraoral stattfindenden Temperaturschwankungen, der professionellen Reinigung mit Pulver-Wasserstrahlgeräten, sowie der Alterung unter Lichtexposition überprüft werden. Daraufgehend werden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen erstellt, welche es erlauben, die Proben grafisch zu untersuchen. Zusätzlich wird mittels der energiedispersiven Röntgenspektroskopie die Verteilung der chemischen Elemente auf der

Probenoberfläche analysiert. Durch Analysen der unversiegelten Kontrollgruppe, welche somit den chemischen Aufbau des Zahnschmelzes mit erhöhten Calcium- und Phosphorwerten widerspiegelt und Analysen von je einer unbelasteten Referenzprobe, die durch erhöhte Kohlenstoffwerte gekennzeichnet ist, können weitere Aussagen zur Qualität der Schutzwirkung getroffen werden.

Da in der vorliegenden Studie erstmalig eine umfassende thermomechanische Prüfung der Glattflächenversiegler durchgeführt wurde, können keine gesicherten, gerichteten Annahmen zum Abschneiden der einzelnen Produkte gemacht werden. Die Hypothesen sollen sodann ungerichtet formuliert werden.

Hypothese 1: Alle Glattflächenversiegler weisen nach der thermomechanischen Belastung Abnutzungserscheinungen auf. Dabei ist im Vergleich zu ihrer Referenzproben ein Unterschied in dem Vorkommen der chemischen Elemente auf der Probenoberfläche festzustellen.

Hypothese 2: Alle Glattflächenversiegler unterscheiden sich nach der thermomechanischen Belastung von der Oberfläche des unversiegelten Zahnschmelzes der Kontrollgruppe.

Hypothese 3: Die Glattflächenversiegler weisen unterschiedliche mechanische Beständigkeit auf und differieren in ihrer chemischen Zusammensetzung.

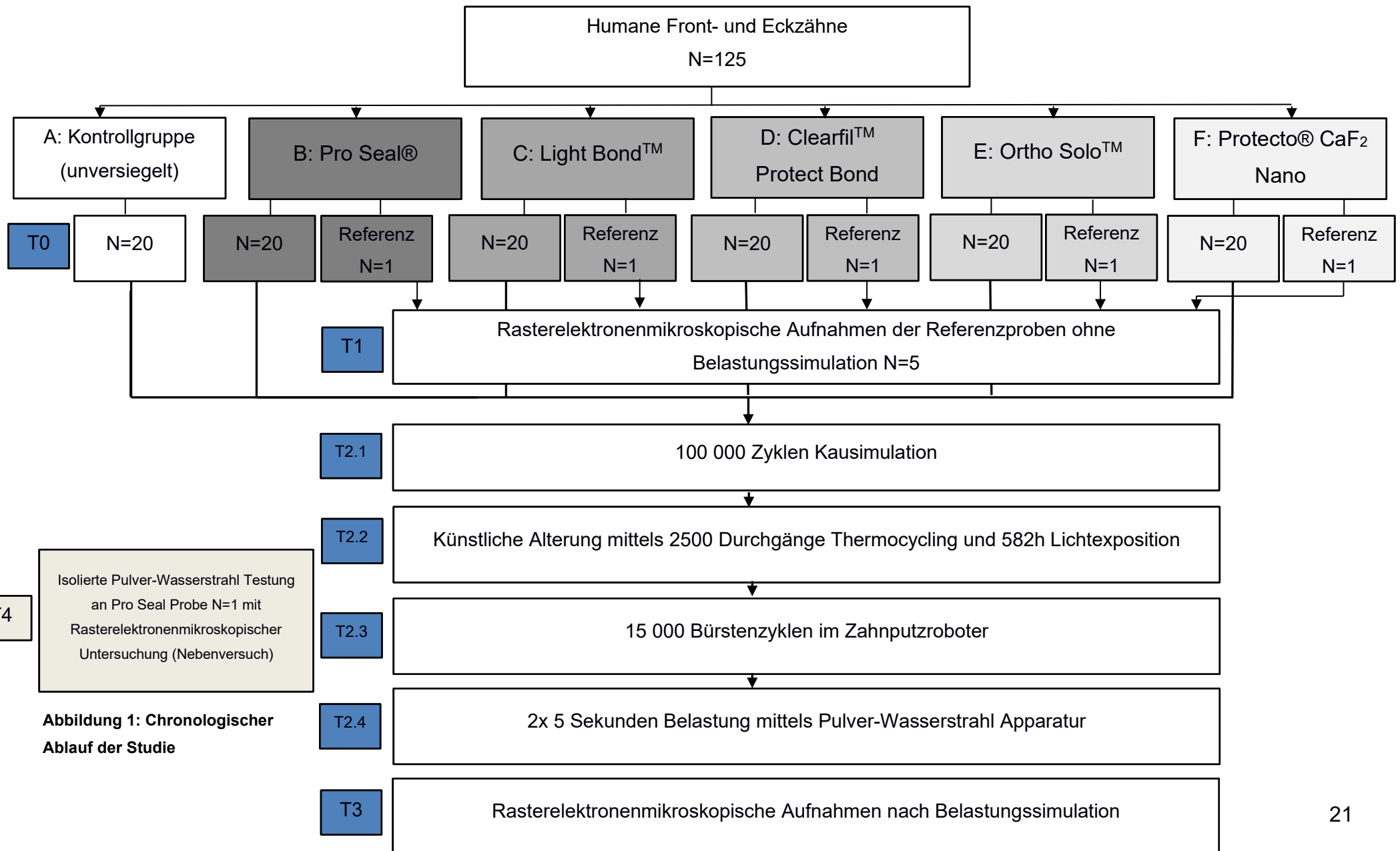
4. Material und Methode

4.1 Auswahl der Zähne und chronologischer Versuchsablauf

Für die vorliegende Studie wurden humane Front- und Eckzähne der zweiten Dentition ausgewählt, welche makroskopisch keinerlei konservierende Versorgungen oder kariöse Läsionen auf der Labialfläche aufwiesen.

Gemäß der Deklaration von Helsinki [152] wurden alle Spender über eine mögliche Verwendung des biologischen Restgewebes in Studien aufgeklärt. Nach Extraktion erfolgte die Lagerung in wässriger Formaldehydlösung. Es wurde ein Zeitraum von zwei Jahren simuliert. Zum Zeitpunkt T0 wurden insgesamt 125 Zähne ausgewählt und nach Entfernung eventueller Konkrementen randomisiert zu den verschiedenen Versuchsgruppen zugeteilt. Die Verteilung der Zähne und der chronologische Versuchsablauf ist in Abbildung 1 dargestellt. Zum Zeitpunkt T1 erfolgte die Anfertigung von Referenzaufnahmen der versiegelten Flächen im Rasterelektronenmikroskop (LEO 1530 VP Fa. Zeiss, Jena, DE). Daraufhin wurden die Belastungstestungen unternommen (Zeitpunkt T2). Hierbei erfolgte zunächst die Exposition im Kausimulator (T2.1) CS-4 (Fa. SD Mechatronik, Feldkirchen, DE), gefolgt von der künstlichen Alterung (T2.2) im Thermocycler (Fa. Haake, Vreden, DE) und der Lichtexposition mithilfe der CPS plus Apparatur (Fa. Atlas material testing, Gelnhausen, DE). Die häusliche Mundhygiene wurde im 6-Achsen Putzroboter Mitsubishi RV-E4NM (Fa. Mitsubishi Electric, Tokio, Japan) zum Zeitpunkt T 2.3 simuliert. Schließlich erfolgte die Pulver-Wasserstrahl Belastung (T2.4) durch das PROPHYpearls® System (Fa. KaVo, Biberach, DE). Nach Abschluss aller Belastungsversuche wurden die Proben erneut rasterelektronenmikroskopisch untersucht (Zeitpunkt T3). Zusätzlich wurde der Einfluss der Pulver- Wasserstrahl Reinigung auf die Pro Seal® Oberfläche exemplarisch in einem Nebenversuch untersucht. Zu diesem Zweck wurde eine zusätzliche Probe mit dem Derivat versiegelt und nach isolierter PROPHYpearls® Anwendung rasterelektronenmikroskopisch betrachtet (Zeitpunkt T4). Tabelle 2 zeigt die Produkte und deren Zusammensetzung bezüglich Angaben der Hersteller.

4. Material und Methode



4. Material und Methode

Tabelle 2: Verwendete Produkte und deren Inhaltsstoffe nach Herstellerangaben

Gruppe: Produkt (Hersteller)	Inhaltsstoffe
B: Pro Seal® (Reliance Orthodontic Products)	<ul style="list-style-type: none"> • Ethoxyliertes Bisphenol-A-Diacrylat (10-50%) • Urethan acrylatester (10-40%) • Polyethylenglycol diacrylat (10-40%) • Fluoridhaltige Glasfritten (5-40%)
C: Light Bond™ (Reliance Orthodontic Products)	<ul style="list-style-type: none"> • Glasfüller (20-50%) • Urethan dimethacrylat (10-30%) • Triethylenglycoldimethacrylat (10-30%) • Hydrofluorid methacrylat (1-3%)
D: Clearfil™ Protect Prime+Bond (Kuraray)	<ul style="list-style-type: none"> • Bisphenol-A-diglycidylmethacrylat (25-40%) • 2-Hydroxyethylmethacrylat (20-40%) • Natriumfluorid (<1%) • Andere Bestandteile • 10- Methacryatoxydecyl Dihydrogenphosphat • 12- Methacryatoyloxydodecyl Pyridinbromid • Hydrophile, aliphatische Dimethacrylate • Wasser • Initiatoren und Akzeleratoren • Farbstoffe
E: Ortho Solo™ (Ormco)	<ul style="list-style-type: none"> • Alkyl dimethacrylat Harz (60-80%) • Bariumaluminoborosilikat Glas (14-24%) • Silikon Dioxid (2-10%) • Sodium Hexafluorosilicat (1-5%) • Ethyl Alkohol (1-5%)
F: Protecto® CaF ₂ Nano	<ul style="list-style-type: none"> • Silikonpolyacrylat • Ethylacetat • Olafluor • Nano-Calciumfluorid • Nano-Fluoridapatit

4.2 Herstellung der Versuchsproben

Zunächst wurden die Zahnwurzeln mittels einer Diamanttrennscheibe der Stärke 0,19mm (Fa. Orbis Dental, Münster, DE) von der Zahnkrone abgetrennt und verbliebene Konkrementen mit Hilfe eines Scalers (SH 3/46, Fa. Hu Friedy, Rotterdam, NL) und des Ultraschallscalers Intralux (Fa. KaVo Biberach, DE) entfernt. Anschließend erfolgte die Politur mit Zircate Prophylaxis Paste (Fa. Dentsply DeTrey Konstanz, DE) und einem Polieraufsatz (Hawe Pro-Cup, Fa. Kerr Hawe Bioggio, CH). Es erfolgte dann die Lagerung der Zähne in 0,1%iger Thymollösung.

Zur besseren Handhabung wurden die mit der Multifunktionsspritze getrockneten Zähne in additionsvernetzendes Silikon (Panasil® Putty, Fa. Kettenbach, Eschenburg, DE) eingebettet.

Für die Gruppen B, C, D und E wurde die gesamte Labialfläche mit 37%iger Phosphorsäure konditioniert (Gel Etch, Fa.Ormco Europe Amersfoort, NL) (Abbildung 2). Die Einwirkzeiten und Verarbeitungsmodi sind in Tabelle 3 aufgeführt. Für Proben der Gruppen A und F wurde lediglich der Bereich, auf dem das Bracket platziert werden sollte, konditioniert.



Abbildung 2: Zahnproben vor der Phosphorsäurekonditionierung

4. Material und Methode

Tabelle 3: Herstellung der einzelnen Versuchsproben

Produkt	Schmelzvorbereitung	Auftragungsmodus	Aushärtung
A: Kontrollgruppe	Keine	Keiner	Keine
B: Pro Seal®	30s H ₃ PO ₄ 20s H ₂ O Vollst. Trocknung mit Multifunktionsspritze	In einer dünnen, gleichmäßigen Schicht	20 s Lichthärtung
C: Light Bond™	30s H ₃ PO ₄ 10s H ₂ O Vollst. Trocknung mit Multifunktionsspritze	In einer dünnen, gleichmäßigen Schicht	20 s Lichthärtung
D: Clearfil™ Protect Bond	10s H ₃ PO ₄ 10s H ₂ O Vollst. Trocknung mit Multifunktionsspritze	1. Primer in einer gleichmäßigen Schicht, 20s Einwirkzeit, mit Multifunktionsspritze Überschüsse entfernen 2. Bonding in einer gleichmäßigen Schicht, dünn mit Multifunktionsspritze verteilen	10 s Lichthärtung
E: Ortho Solo™	30s H ₃ PO ₄ 10s H ₂ O Vollst. Trocknung mit Multifunktionsspritze	In einer dünnen, gleichmäßigen Schicht	20 s
F: Protecto® CaF ₂ Nano	Keine	Mittels Filzapplikator des Herstellers dünn auftragen und Lufttrocknen lassen. Vorgang 4x wiederholen	Lufttrocknung

4.2.1 Herstellung der Kontrollproben (Gruppe A)

Diese Gruppe beinhaltet Proben, welche nicht versiegelt wurden. Nach dem Konditionieren wurden sie mit einem Bracket (Discovery®, Slot 0,46x0,76mm/18x30, Torque 0°, Angulation 0°, Zahn 31, Fa. Dentaaurum, Ispringen, DE) versehen. Als Befestigungsmaterialien wurde Transbond™ XT Primer und Adhäsiv (Fa. 3M Unitec, Landsberg, DE) verwendet. Nach Platzierung und Ausrichten des Brackets auf der Vestibulärfläche der Probe mittels einer Dentalsonde (Orbis Dental 433124, Münster, DE) erfolgte die Aushärtung mit einer Halogenlampe (PolyLux2, Fa. KaVo, Biberach, DE) im Wellenlängenbereich 360-500 nm. Dabei wurde die Fläche 10 Sekunden von gingival und anschließend 10 Sekunden von vestibulär belichtet (Abbildung 3).

Anschließend wurde jeder Zahn auf einer Bausteinplatte (Fa. Lego, Billund, DK) mit Sekundenkleber (Blymet S5, Fa. Byla GmbH, Runkel, DE) vorfixiert und mit Heißkleber (Pattex®, 61299707, Fa. Henkel, Düsseldorf, DE) definitiv befestigt (Abbildung 4). Schließlich erfolgte die Lagerung in einer Speichellersatzlösung (Apomix Fa. AMH Niemann GmbH&Co KG Halle).



Abbildung 3: Positionierung der Brackets

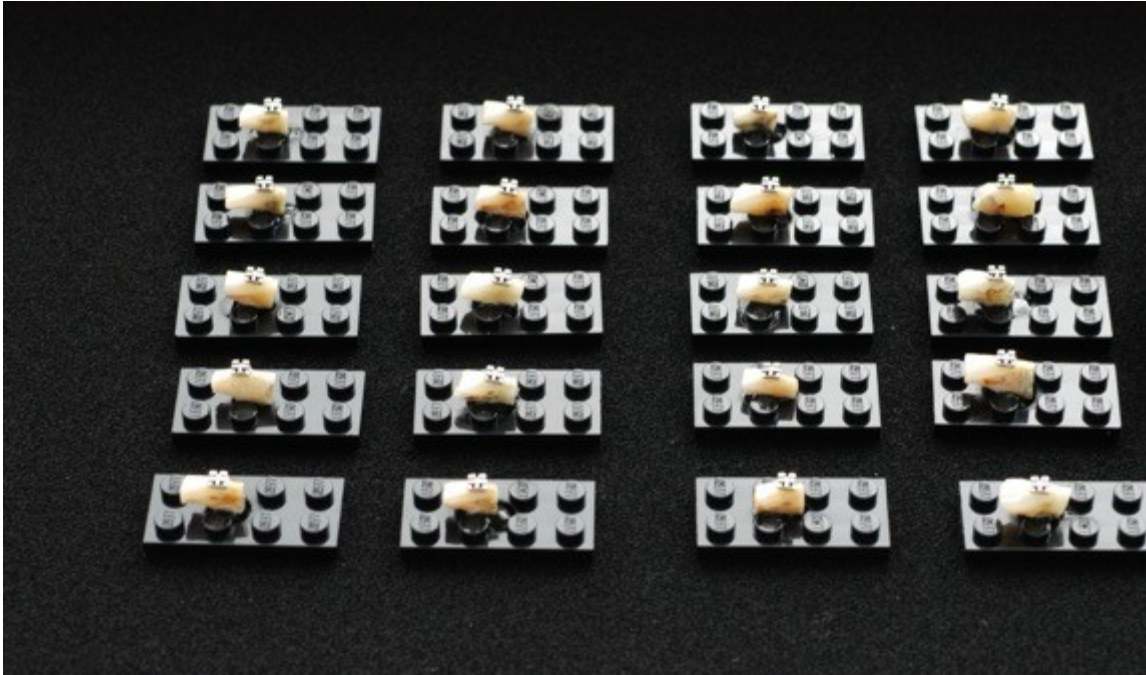


Abbildung 4: Testproben vor der definitiven Befestigung auf einer Bausteinplatte

4.2.2. Herstellung der Pro Seal®-, Light Bond™-, Clearfil™ Protect Bond-, und Ortho Solo™ Proben (Gruppen B, C, D, E)

Nach dem Konditionieren der gesamten Zahnoberfläche erfolgte das Auftragen der Produkte nach Herstellerangaben. Nach Aushärtung mit der Polymerisationslampe erfolgte analog zur Gruppe A die Befestigung des Brackets sowie die Fixierung auf einer Bausteinplatte.

4.2.3 Herstellung der Protecto® CaF₂ Nano Proben (Gruppe F)

Bei Protecto® CaF₂ Nano handelt es sich um einen silikongruppenhaltigen Fluoridlack. Da dieser keine Verbindung mit dem Zahnschmelz im Rahmen einer retentiven Säureätztechnik eingeht, wurde bei dieser Gruppe das Bracket analog zur Kontrollgruppe befestigt und anschließend das Produkt im Sinne einer Bracketumfeldversiegelung verwendet. Das Material wurde mit den Applikatoren des Herstellers aufgetragen und bei Raumtemperatur Lufttrocknen gelassen. Dieser Vorgang wurde gemäß der Anweisung des Herstellers viermal hintereinander durchgeführt.

4.3 Kausimulation

Im ersten Schritt der thermomechanischen Belastung wurden die Testproben im Kausimulator CS-4 (Fa. SD Mechatronik, Feldkirchen, DE) platziert. Hierbei wurden die Bausteine auf einer zweiten Basisplatte, welche fest mit dem Kausimulator verbunden war, reproduzierbar positioniert (Abbildung 5). Jede der 8 Testkammern des Simulators wurde mit einer Probe bestückt, mit destilliertem Wasser übergossen und von einer Steatitkugel belastet (Abbildung 6).

Dabei handelt es sich um ein semiporöses, keramisches Material, welches in Kaubelastungsversuchen Anwendung findet [60]. Jede Probe wurde bei einer Frequenz von 1,6 Hz und 20 N Gewicht belastet.

Die Keramikugel beschrieb folgendes Bewegungsmuster: Eine Abwärtsbewegung Z von 3 mm und eine Bewegung X lateral von 1 mm. In der Aufwärts-/Abwärtsbewegung wurden 30,0 mm/s Geschwindigkeit erreicht. Bei der Vor- / Zurückbewegung waren es 20,0 mm/s. Nach 100 000 Zyklen, welche 17 Stunden und 40 Minuten entsprachen, wurden die Proben ausgetauscht und die Testkammer erneut mit destilliertem Wasser aufgefüllt.



Abbildung 5: Proben im CS-4 Kausimulator

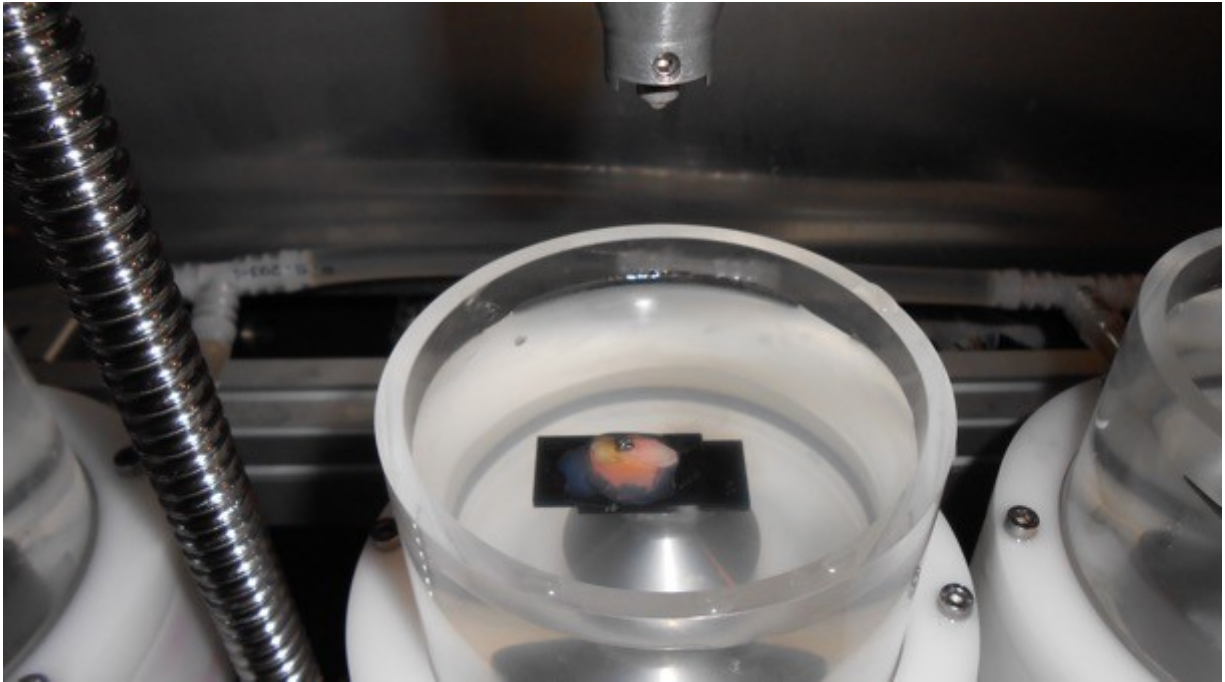


Abbildung 6: Eingesetzte Probe in Testkammer des Kausimulators

4.4 Künstliche Alterung

Die künstliche Alterung wurde in der vorliegenden Studie durch zwei Testverfahren simuliert. Temperaturschwankungen in der Mundhöhle wurden mit Hilfe von unterschiedlich temperierten Wechselbädern nachgeahmt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Thermocycling Apparatur

Dabei wechselten die Proben zwischen zwei mit destilliertem Wasser befüllten Bädern von 5 °C bzw. 55°C. In jedem Becken betrug die Verweildauer 30s. Die Abtropfzeit dauerte 15s. Insgesamt wurden 2500 Zyklen durchgeführt.

Um den Einfluss von Lichtexposition auf die Proben zu untersuchen wurden diese mit Hilfe des CPS plus Gerätes (Fa. Atlas material testing, Gelnhausen, DE) belichtet (Abbildung 8). Die unter der Xenonlampe platzierten Proben wurden einer Energie von 50 000 kJ/m² ausgesetzt. Dies entspricht einer Beleuchtungsstärke von 135 000 Lux bei 400 nm Wellenlänge [46].

Durch kontinuierlichen Zufluss von destilliertem Wasser wurden die Proben bei 36 Grad Celsius feucht gehalten. Nach einer Versuchsdauer von etwa 584 Stunden wurden die Proben entnommen.



Abbildung 8: Proben in der Belichtungskammer des CPS plus Gerätes

4.5 Pulver-Wasserstrahl Reinigung (PWS)

Entsprechend der simulierten Behandlungsdauer von 2 Jahren wurden beispielhaft zwei Zyklen mit professioneller Zahnreinigung durchgeführt. Hierbei wurden die Proben mit einem Pulver-Wasserstrahl Gemisch (PWS) (PROPHYpearls™, Fa. KaVo, Biberach, DE) abgestrahlt.

Die Labialflächen der Proben wurden senkrecht und im Abstand von 5 mm zur Austrittsdüse auf einer Basisplatte aufgesetzt. Die Apparatur wurde an die Turbine der Behandlungseinheit (Fa. KaVo, Biberach, DE) angeschlossen und an einem Stativ befestigt (Abbildung 9, Abbildung 10).

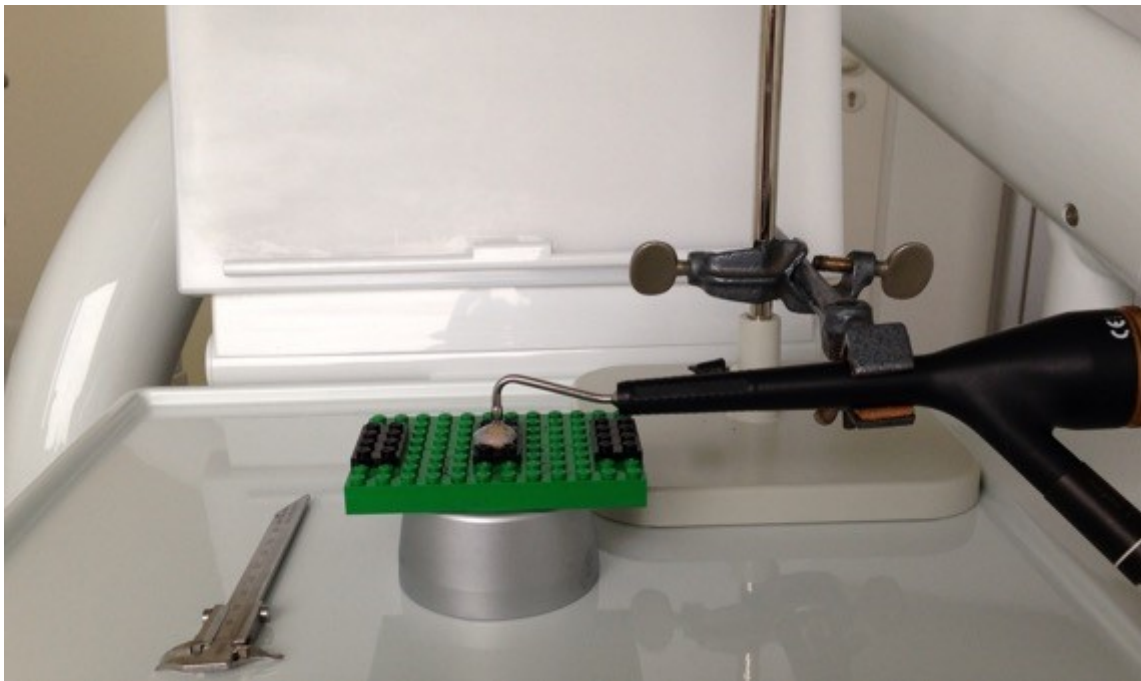


Abbildung 9: Versuchsaufbau der Pulver-Wasserstrahl Testung



Abbildung 10: Düse der PROPHYpearls™ Apparatur in 5mm Abstand zur Zahnoberfläche

Als Strahlmittel wurde Calciumcarbonatpulver (KaVo PROPHYpearls™ Fa. KaVo, Biberach, DE) verwendet. Jeder Zahn wurde zwei mal fünf Sekunden abgestrahlt. Um sicherzustellen, dass möglichst immer die gleiche Pulvermenge austrat, wurde nach jeder Probe der Gerätekopf aus dem Stativ entnommen und das Pulver in Richtung Düse geschwenkt. Durch Absaugen des Pulverüberschusses auf der grünen Unterplatte konnte optisch überprüft werden, ob ausreichend Calciumcarbonat austrat.

In einem zusätzlichen Nebenversuch wurde eine weitere Zahnproben ausgewählt und mit Pro Seal® gemäß Abschnitt 4.2.2 versiegelt. Dadurch sollte der Einfluss der PWS-Reinigung auf Pro Seal® getestet werden. Die Probe wurde zweimal fünf Sekunden lang abgestrahlt. Im Anschluss erfolgte unverzüglich die Aufnahme unter dem Rasterelektronenmikroskop.

4.6 Putzsimulation

Die Auswirkungen des täglichen Zähneputzens wurde mit Hilfe des 6-Achsen Putzroboters Mitsubishi RV-E4NM (Fa. Mitsubishi Electric, Tokio, Japan) untersucht (Abbildung 11).

Dabei wurden je 8 Proben von der im Roboter eingespannten Handzahnbürste Oral-B Cross Action (Fa. Procter&Gamble, Cincinnati, Ohio, USA) sequentiell abgebürstet. Das Gerät führte dabei eine lineare Vor- und Rückbewegung mit einer Amplitude von 10 mm aus. Die Anpresskraft wurde auf 2,8 N eingestellt [84].

Nach 15 Bürstenzyklen ging das Gerät zur nächsten Probe über. Dieser Vorgang wurde tausendfach wiederholt, bis jede Zahnprobe mit 15 000 Bürstenzyklen belastet wurde [28,80,112]. Die Zahncremesuspension wurde entsprechend des Standardprotokolls nach Imfeld aufgesetzt [84]: 10g Kalziumpyrophosphat, 50g Lösung aus Carboxymethylcellulose (0,5%), Glycerol (10%) und Speichelersatzlösung sowie ein 50 µl Antischaumbildner wurden zu einem Standardabrasiv zusammengefügt. Dieses wurde bei konstanter Raumtemperatur mit Hilfe eines Magnetrührers kontinuierlich durchmischt und auf 25°C gehalten [128]. Nach 15 000 Zyklen wurden Zahnbürste und Suspension erneuert.



Abbildung 11: Mitsubishi RV-E4NM Putzsimulator

4.7 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (REM) und energiedispersive Röntgenspektroskopie (REM-EDX)

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden mittels des LEO 1530 VP Gerätes (Fa. Zeiss, Jena, DE) durchgeführt.

Die Betriebsspannung lag zwischen 10 und 20 kV. Anhand des Maßstabbalkens unterhalb jeder Darstellung können die Größen der abgebildeten Strukturen abgelesen werden. Übersichtsaufnahmen wurden bei dreißigfacher Vergrößerung angefertigt. Zur Detailuntersuchung wurde diese auf den Faktor 1000 erhöht.

Die zu untersuchenden Proben wurden mit einem leitfähigen Haftmittel an Aluminiumstreifen fixiert (Leit C Plast, SPI Supplies, West Chester, Penn, USA). Daraufhin erfolgte die Belegung der Oberfläche mit einer etwa 9 nm dicken Silberschicht mit Hilfe des Polaron SC 7640 Gerätes (Fa. Polaron, Hertfordshire, UK).

Mit Hilfe des energiedispersiven Röntgenspektrometers (EDX) Inca Energy 200 (Fa. Oxford Instruments, Abingdon-on-Thames, UK) wurde der Nachweis der chemischen Elemente auf den Probenoberflächen erbracht.

Dabei werden monochromatische Röntgenstrahlen auf die zu untersuchenden Proben emittiert. Das von den Elementen der Oberfläche reflektierte, charakteristische Licht wird von einem Detektor aufgezeichnet und analysiert. Zunächst wurden die unbelasteten Referenzproben der Gruppen B-F herangezogen und nach dem Vorkommen chemischer Elemente untersucht. Exemplarisch wurden zwei weitere Proben jeder Gruppe zufällig ausgewählt und untersucht. Weiterhin wurde der Aufbau der Zahnschmelzoberfläche anhand dreier zufällig ausgewählten Proben der Kontrollgruppe (A) analysiert. Auf jeder Oberfläche wurden drei Messbereiche zufällig ausgewählt und auf das Vorkommen chemischer Elemente in dem jeweiligen Bereich untersucht.

4.8 Statistische Auswertung

Zur statistischen Prüfung der Hypothesen 1 2 und 3 wurden nicht-parametrische Analyseverfahren durchgeführt. Im Falle der Hypothese 1 wurde der Mann-Whitney U-Test [106] verwendet, um Unterschiede zwischen den versiegelten Proben nach der Belastung und den unbelasteten Referenzproben zu prüfen. Spezifischer wurden die Proben auf eine Abnahme des nachgewiesenen Kohlenstoffes (C), bei einer Zunahme des Nachweises von Calcium (Ca) und Phosphorwerten (P) durch

Abnahme der Versiegelungsstärke untersucht.

Bezüglich Hypothese 2 und Hypothese 3 wurde der Kruskal-Wallis-Test angewandt [97]. Im Vergleich zum Hydroxylapatit des Zahnschmelzes wurden die Proben auf erhöhte Kohlenstoffwerte (C) und niedrigere Werte für Calcium (Ca) und Phosphor (P) untersucht (Hypothese 2).

Die statistische Analyse erfolgte mittels IBM SPSS statistics Version 25. Ausgehend von der Annahme, dass die Glatflächenversiegler sich in ihrem chemischen Aufbau unterscheiden, wurde analysiert, ob sich bei schwächerer mechanischer Beständigkeit geringere Kohlenstoffwerte (C) und höhere Werte in den Calcium (Ca)- und Phosphoranteilen (P) nachweisen lassen (Hypothese 3). Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha=0,05$ festgelegt.

5. Ergebnisse

5.1 Energiedispersive Röntgenspektroskopie - Aufnahmen (REM-EDX)

5.1.1 Hypothese 1

Hypothese 1 geht von einem Unterschied in der Verteilung der chemischen Elemente auf der Probenoberfläche im Vergleich zur Referenzprobe aus. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Mittelwerte und Standardabweichungen; alle Angaben in Mass%.

Tabelle 4: Versiegler nach Belastung im Vergleich zur unbelasteten Referenzprobe mit Mittelwert (M), Standardabweichung (SD)

	Kohlenstoff		Phosphor		Calcium	
	M	SD	M	SD	M	SD
B: Pro Seal®						
Belastete Proben	35,95	18,18	6,2	9,34	17,47	28,86
Referenzproben	56,63	0,68	0	0	0	0
C: Light Bond™						
Belastete Proben	10,72	2,59	14,05	0,83	28,82	2,42
Referenzproben	8,13	10,74	3,13	4,14	30,17	6,75
D: Clearfil™ Protect Bond						
Belastete Proben	26,27	12,27	9,02	4,62	19,22	10,44
Referenzproben	1,77	0,85	0,93	0,21	44,87	2,27
E: Ortho Solo™						
Belastete Proben	9,55	13,47	13,7	6,69	27,82	13,22
Referenzproben	13,97	5,05	5,5	1,65	15,97	3,89
F: Protecto® CaF₂ Nano						
Belastete Proben	11,93	2,86	13,42	1,13	29,27	1,86
Referenzproben	19,2	2,43	7,4	0,26	42,07	0,96
<i>Anmerkung: N = 6 für belastete Proben, N = 3 für Referenzproben; Angabe in Mass%</i>						

Der Mann-Whitney U-Test lieferte für die Ergebnisse der Versiegler der Gruppen B,C und F (Pro Seal®, Light Bond™ und Protecto® CaF₂ Nano) signifikante Ergebnisse

($p=0,024$). Im Falle der Gruppen D und E (Clearfil™ Protect Bond und Ortho Solo™) zeigten die chemischen Elemente im Mann-Whitney U-Test keine Signifikanz ($p=0,167$). Hypothese 1 wird teilweise angenommen: Es gab eine hypothesenkonforme Veränderung aller chemischen Elemente in Gruppe B (Pro Seal®) und E (Ortho Solo™). In Gruppe C (Light Bond™) und D (Clearfil™ Protect Bond) verhielten sich die Werte für Phosphor (P) hypothesenkonform, für Kohlenstoff (C) und Calcium (Ca) hingegen nicht. In Gruppe F (Protecto® CaF₂ Nano) wiesen die Werte für Kohlenstoff (C) und Phosphor (P) die erwarteten Änderungen auf, für Calcium (Ca) hingegen nicht.

5.1.2 Hypothese 2

Hypothese 2 geht von einem Unterschied in der Verteilung der chemischen Elemente auf der Probenoberfläche im Vergleich zur unversiegelten Kontrollgruppe nach der thermomechanischen Belastung aus. Zur Prüfung der Hypothese wurde der Kruskal-Wallis Test als verteilungsfreies Verfahren herangezogen. Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte aus den in Massenprozent gefundenen Werten für die versiegelten Proben und der unversiegelten Kontrollgruppe.

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Versiegler (Mass%) und der Kontrollgruppe nach der thermomechanischen Belastung

	Kohlenstoff		Phosphor		Calcium	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
A: Kontrollgruppe	12,59	4,03	13,80	2,39	30,76	5,85
B: Pro Seal ®	35,95	18,18	6,2	9,34	17,47	28,86
C: Light Bond™	10,72	2,59	14,05	0,83	28,82	2,42
D: Clearfil™ Protect Bond	26,27	12,27	9,02	4,62	19,22	10,44
E: Ortho Solo™	9,55	13,47	13,7	6,69	27,82	13,22
F: Protecto® CaF₂ Nano	11,93	2,86	13,42	1,13	29,27	1,86
Anmerkungen. N = 6 für belastete Proben, N = 9 für Kontrollgruppe;						

Der Kruskal-Wallis Test zeigte für alle chemischen Elemente ein signifikantes Ergebnis. Für den Kohlenstoff ergab sich $H=15,97$ ($p=0,007$), für den Phosphor $H=13,06$ ($p=0,023$) und das Calcium $H=11,06$ ($p=0,05$).

Die Mehrfachvergleiche innerhalb des Kruskal-Wallis Tests zeigte signifikante

Ergebnisse für die Versieglergruppen B (Pro Seal®, $p=0,029$) und D (Clearfil™ Protect Bond, $p=0,021$) im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Die übrigen Glattflächenversiegler zeigten keinen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe ($p>0,05$). Hypothese 2 wird somit für die Testprobengruppen B und D angenommen und für alle übrigen Versieglergruppen abgelehnt.

5.1.3 Hypothese 3

Hypothese 3 postuliert Unterschiede in der Verteilung der chemischen Elemente zwischen den einzelnen Glattflächenversiegler nach der thermomechanischen Belastung. Zur Prüfung wurde erneut der Kruskal-Wallis Test herangezogen. In den deskriptiven Statistiken ist zunächst zu erkennen, dass Gruppe B (Pro Seal®) nach der thermomechanischen Belastung mit $M=35,95$ ($SD=18,18$) den höchsten Anteil des Kohlenstoffs aufweist, während Gruppe E (Ortho Solo™) mit $M=9,55$ ($SD=13,47$) den geringsten Anteil aufweist. Bezüglich des Phosphors zeigt die Gruppe C (Light Bond™) mit $M=14,05$ ($SD=0,83$) den höchsten und die Gruppe B (Pro Seal®) mit $M=6,20$ ($SD=9,34$) den geringsten Wert auf. In der Verteilung des Calciums zeigt Gruppe B (Pro Seal®) mit $M=17,47$ ($SD=28,86$) den geringsten Wert, während die Gruppe F (Protecto® CaF₂ Nano) mit $M=29,27$ ($SD=1,86$) den höchsten Wert aufweist.

Der Kruskal-Wallis Test konnte für die Verteilung der Elemente Kohlenstoff ($H=13,45$; $p=0,009$) und Phosphor ($H=11,35$; $p=0,023$) signifikante Werte zeigen, während die Unterschiede zwischen den Glattflächenversiegler in den Calciumanteilen mit $H=9,16$ ($p=0,057$) gerade nicht mehr signifikant wurden. Hypothese 3 wird teilweise angenommen: Es fanden sich statistisch signifikante Unterschiede in dem Vorkommen der chemischen Elemente zwischen den Gruppen B (Pro Seal®) und C,E,F (Light Bond™, Ortho Solo™, Protecto® CaF₂ Nano) einerseits, sowie D (Clearfil™ Protect Bond) und C,E,F (Light Bond™, Ortho Solo™, Protecto® CaF₂ Nano) andererseits. Vergleiche der Gruppen B (Pro Seal®) mit D (Clearfil™ Protect Bond), sowie C, E und F (Light Bond™, Ortho Solo™ und Protecto® CaF₂ Nano) miteinander waren nicht signifikant.

5.2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM)

5.2.1 Gemeinsame Beobachtungen aller Gruppen

Die Oberflächen aller Proben wurden mit Hilfe rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen betrachtet. Auf der jeweiligen linken Bildhälfte sind die Aufnahmen in der Übersichtsdarstellung abgebildet. Dort ist zudem am linken Bildrand das Bracket zu erkennen. Im rechten Bildrand konnten deutliche Impressionen der Keramikugel des Kausimulators festgestellt werden. Die Detailaufnahmen der jeweiligen Probe ist auf der rechten Seite abgebildet. Risse durchzogen die Oberfläche zahlreicher Proben. Ansammlungen kokkenförmiger Bakterien, Schmutzpartikel und die Sichtbarkeit des Leitfähigkeitsmittels waren als Nebenfunde festzustellen. Diese sind jeweils den Bildbeschreibungen zu entnehmen.

5.2.2 Gruppe A (Kontrolle)

In den Abbildungen 12-17 sind die Aufnahmen der unversiegelten Kontrollgruppe nach erfolgter Belastungssimulation dargestellt. Es zeigten sich ausgeprägte Alterungs- und Abnutzungserscheinungen der Zahnoberfläche. In der Übersichtsdarstellung (Abb. 12,14,16) konnten diverse Schmelzrisse beobachtet werden, welche mit teilweise sehr deutlich abgezeichneten Bruchspalten imponierten (Abbildung 16).

Die Detailaufnahmen (Abb. 13,15,17) derselben Proben in eintausendfacher Vergrößerung zeigten vorwiegend glatte Zahnoberflächen. Typische Prismenstrukturen waren teilweise darstellbar (Abb. 13). Diese Kristallverbände hatten häufig eine abgerundete, alterierte Form (Abb. 17) und wurden von Zonen aprismatischen Schmelzes unterbrochen (Abb. 17). Vereinzelt wurden bis zu 2 µm große Ansammlungen kokkenförmiger Bakterien und Schmutzpartikel beobachtet (Abb. 15).

5. Ergebnisse

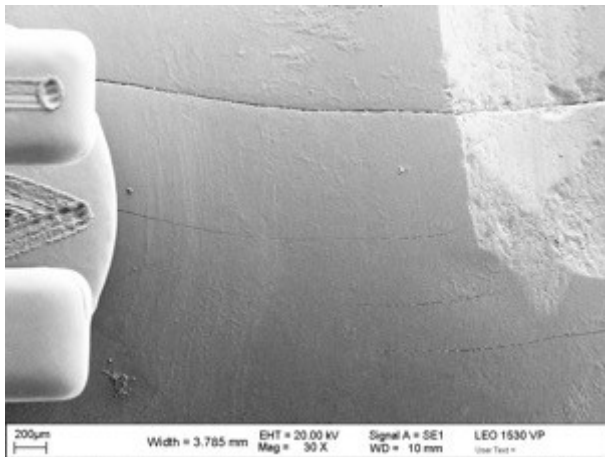


Abbildung 12: Aufnahme der unversiegelten Labialfläche. Wachstumslinien und Rissbildungen erkennbar. Probe A5, 30x

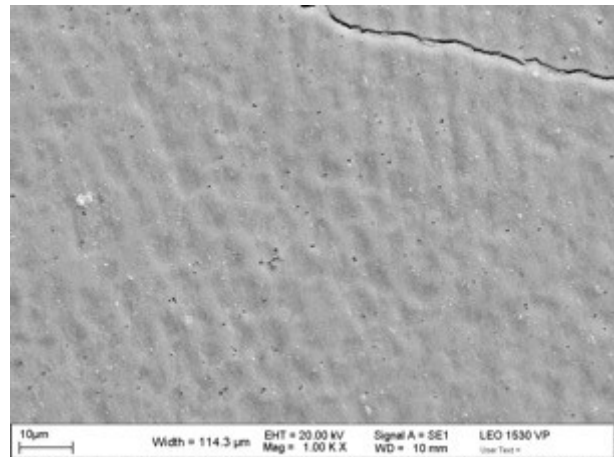


Abbildung 13: Detailaufnahme. Abgeflachte Schmelzprismen. Probe A5, 1000x

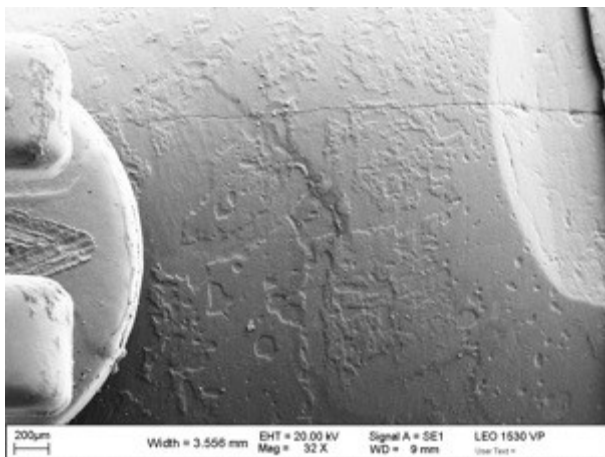


Abbildung 14: Ungleichmäßige, raue Oberfläche der unversiegelten Probe A15, 32x

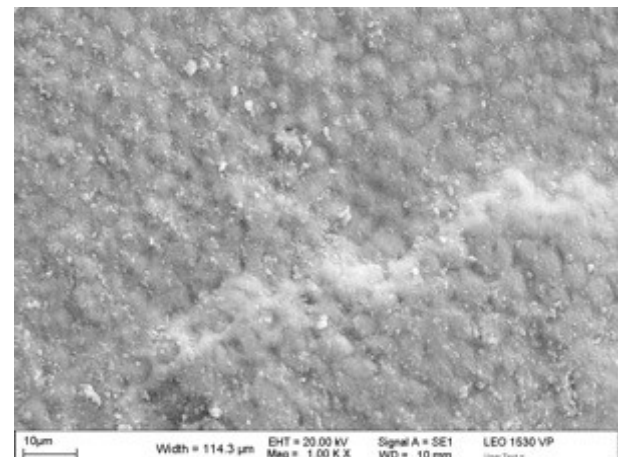


Abbildung 15: Detailaufnahme. Prismenstrukturen erkennbar. Vereinzelt Bakterien und Schmutzpartikel. Probe A15, 1000x

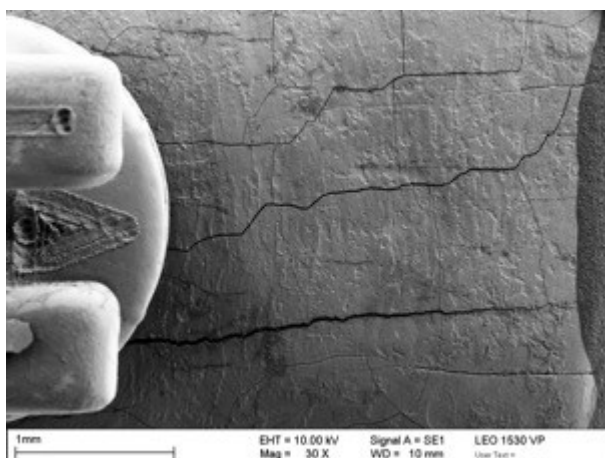


Abbildung 16: Ausgeprägte Rissbildungen auf der unversiegelten Labialfläche. Probe A19, 30x

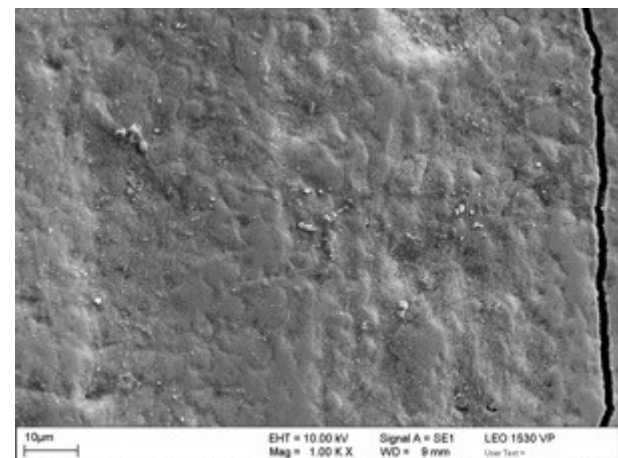


Abbildung 17: Detailaufnahme. Schmelzprismen teilweise erhalten. Probe A19, 1000x

5.2.3 Gruppe B (Pro Seal®)

In Abb. 18 ist die Pro Seal® Referenzprobe in der Übersichtsvergrößerung dargestellt. Der Versiegler bedeckte die gesamte Zahnoberfläche in einer sehr homogen, glatten und dunklen Schicht, welche zentral durch einen Lufteinschluss von etwa 0,1mm Durchmesser unterbrochen wurde. Unterhalb der Bracketbasis zeigte sich im linken Bildrand ein etwa 0,42 mm² großes, klar abgegrenztes Areal freiliegender Zahnoberfläche. Die Detailaufnahme (Abb. 19) zeigte eine homogene, dunkle und lückenlose Schicht. Quarzfüllpartikel variierender Größe zwischen 4-12 µm waren zu erkennen. In Abbildung 20 war eine aufgeraute, teilweise durch exponierten Zahnschmelz unterbrochene Versiegelungsschicht zu beobachten. Hierbei zeigte die Detaildarstellung der Probe B7 (Abb. 21) eine dunkle Oberfläche mit intakter, rauer Versiegelungsfläche, welche im zentralen Bildbereich durch ein Areal mit exponiertem Zahnschmelz unterbrochen wurde. Abbildung 22 zeigte eine zusammenhängende, aufgeraute und größtenteils intakte Schicht des Versieglers. Im rechten Bildrand zeigte sich der etwa kreisrunde Bereich freiliegenden Zahnschmelzes. Die typischen Prismenstrukturen waren hier zu erkennen. Die Bereiche des Zahnschmelzes und der Polymerdecke waren grafisch klar voneinander differenzierbar. Die Oberfläche von Probe B20 (Abb. 23) zeigte eine vollständige, dunkle und weitgehend homogene Beschaffenheit. In Abgrenzung der Referenzprobe war diese rauer und es waren einzelne Vertiefungen im Material angeschnitten, in deren Zentrum gelegentlich Quarzfüllkörper zu finden waren. Allgemein führten die thermomechanischen Belastungsversuche zu einer visuellen Zunahme der Rauigkeit des Materials. Einige Areale zeigten freiliegenden Zahnschmelz und unterbrachen so die zumeist intakte Versiegelung. Bei keiner der untersuchten Proben war das Material vollständig abgetragen.

5. Ergebnisse

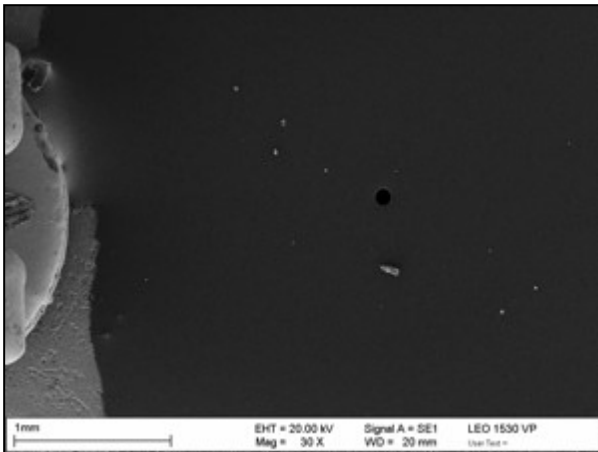


Abbildung 18: Referenzprobe Pro Seal®. Zentraler Lufteinschluss. Freiliegender Schmelz unterhalb der Bracketbasis, 30x

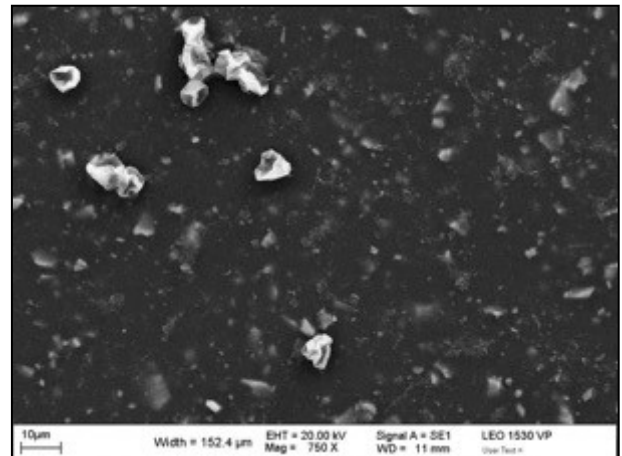


Abbildung 19: regelmäßige dunkle Schicht mit bis zu etwa 10 µm großen Füllkörpern. Pro Seal® Referenzprobe, 750x

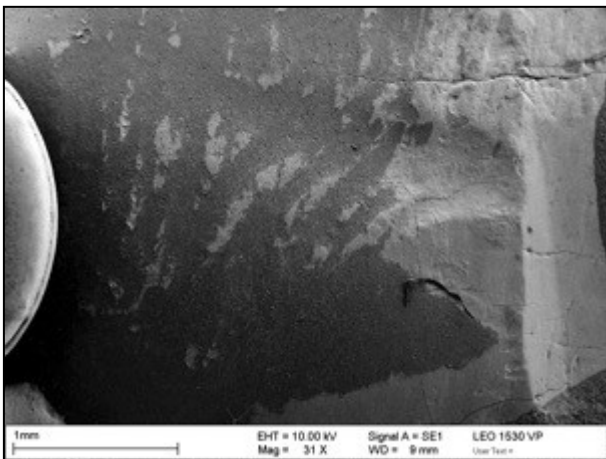


Abbildung 20: Lücken in Sealerschicht, Probe B7, 31x

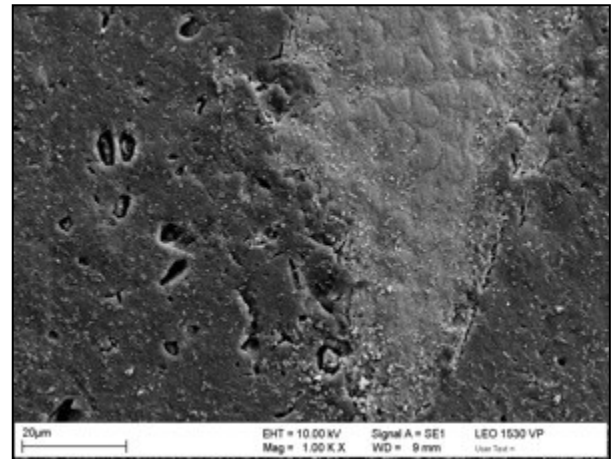


Abbildung 21: Zentral freiliegender Zahnschmelz, Prismenstrukturen, umgeben von Versiegelung, Probe B7, 1000x

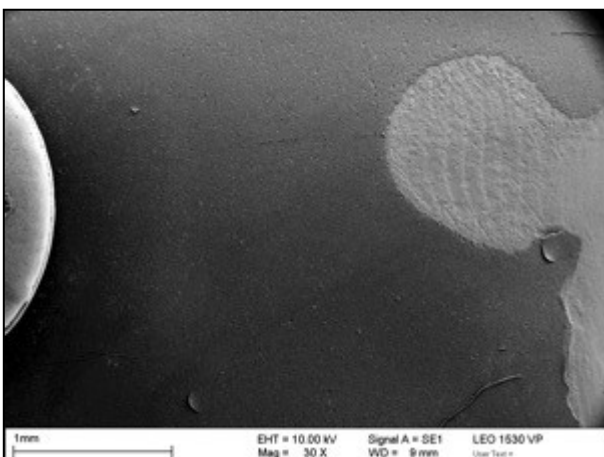


Abbildung 22: Intakte Versiegelung; Freiliegender Zahnschmelzbereich rechts Probe B20, 30x

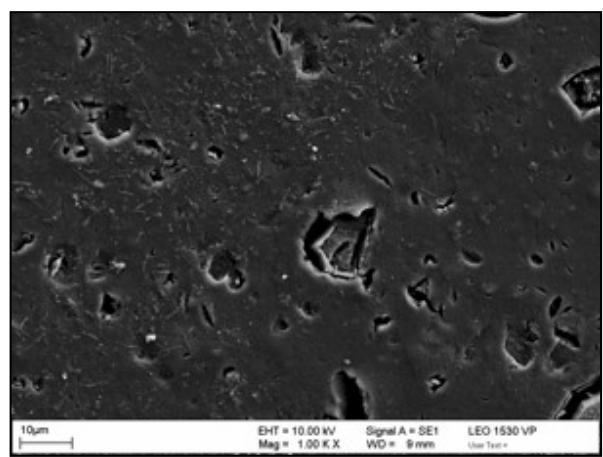


Abbildung 23: Intakte Lackschicht mit Vertiefungen, Probe B20, 1000x

5.2.6 Gruppe C (Light Bond TM)

Abb. 24 zeigt die mit Light Bond TM versiegelte Referenzprobe. Diese zeigte eine inhomogene Beschaffenheit der Oberfläche, bei der eine dünn erscheinende, vorwiegend helle Schicht den Zahnschmelz bedeckte. In der Detaildarstellung der Referenzprobe (Abb. 25) war die Zahnoberfläche lückenlos und ungleichmäßig bedeckt. Das Material zeigte alternierend hellere und dunklere Bereiche. Risse und Porenbildung des Materials waren zu verzeichnen.

Probe C14 zeigte in der Übersichtsvergrößerung (Abb. 26) eine helle Zahnschmelzoberfläche, welche von diversen, tiefen Rissen durchzogen war. Im zentralen Bildbereich war ein marginaler Rest von Versiegelungsmaterial zu erkennen. In eintausendfacher Detaildarstellung (Abb. 27) konnten die für den Zahnschmelz typischen wabenförmigen Schmelzprismen beobachtet werden. Neben den diversen Rissen, die in der Übersichtsaufnahme der Probe C18 (Abb. 28) zu sehen waren, zeigte die versiegelungsfreie Zahnschmelzoberfläche eine ausgeprägt raue, säurekonditionierte Struktur. In Detailansicht (Abb. 29) wird diese Struktur und die tiefe Rissbildung deutlich.

Die gesamte Testgruppe konnte als eine helle, versiegelungsfreie Oberfläche beschrieben werden. Hierbei ähnelten diese den Ergebnissen der unversiegelten Kontrollgruppe mit diversen Abnutzung- und Alterungserscheinungen des Schmelzes.

5. Ergebnisse

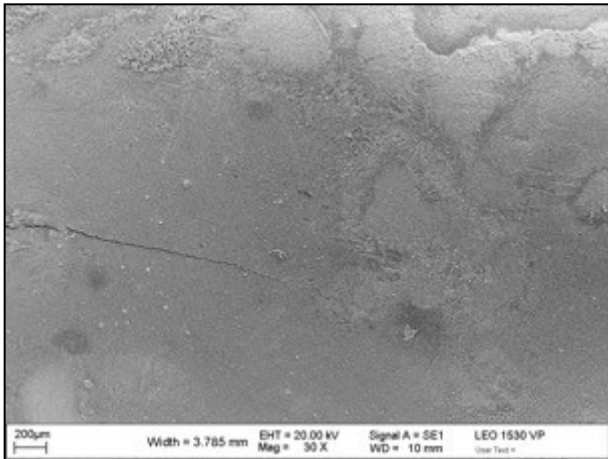


Abbildung 24: Referenzprobe Light Bond TM, 30x

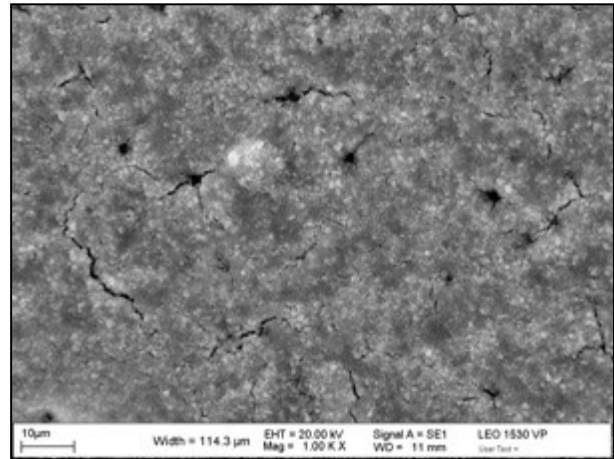


Abbildung 25: Referenzprobe Light Bond TM,
Einziehungen in Oberfläche. 1000x

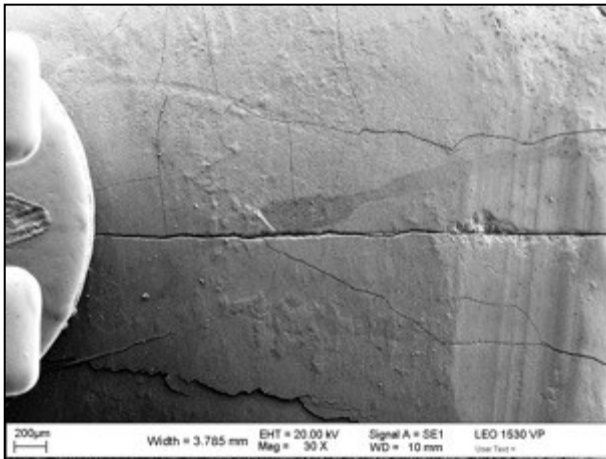


Abbildung 26: Diverse Schmelzrisse, sowie zentral,
kleinflächig versiegelter Bereich. Probe C14, 30x

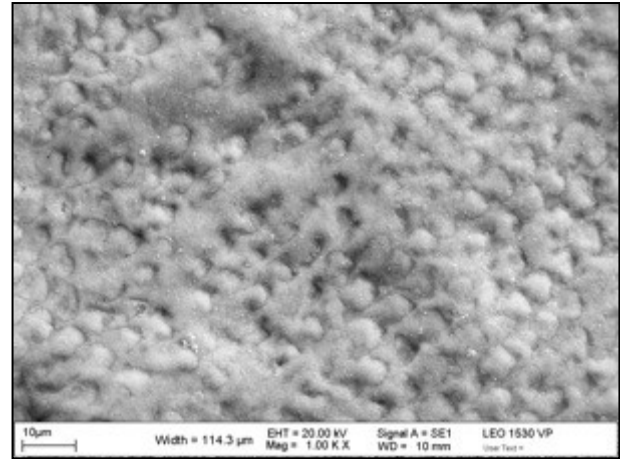


Abbildung 27: Freiliegende, wabenförmige
Schmelzprismen, Probe C14, 1000x

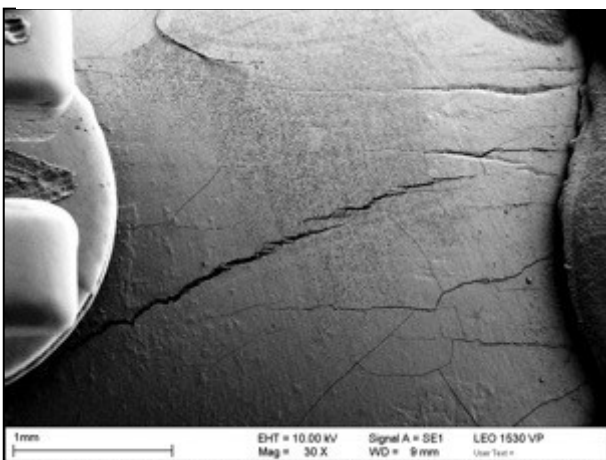


Abbildung 28: Freiliegende, säurekonditionierte
Schmelzoberfläche, tiefe Rissbildung. Probe C18, 30x

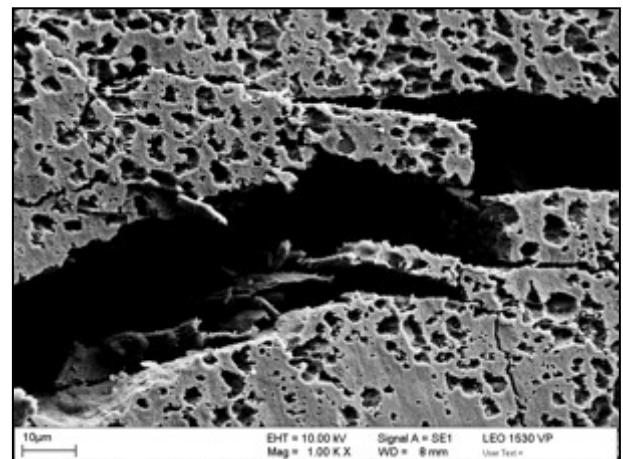


Abbildung 29: Tiefer Riss in säurekonditionierten
Schmelz, Probe C18, 1000x

5.2.7 Gruppe D (Clearfil™ Protect Bond)

In Abb. 30 ist die mit Clearfil™ Protect Bond versiegelte Referenzprobe in der Übersichtsvergrößerung abgebildet. Der Sealer bedeckte die Schmelzoberfläche lückenlos in einer heterogenen Schicht, welche verschiedene Farbabstufungen und Unebenheiten aufwies. In der dazugehörigen Detaildarstellung (Abb. 31) stellte sich das Material als ein Polymer mit spongiosaähnlicher Mikrostruktur dar. Die Übersichtsdarstellung der Probe D7 (Abb. 32) zeigte im oberen, linken Bildrand noch einen zusammenhängenden Bereich, der von Clearfil™ Protect Bond bedeckt war. Diese Restareale waren deutlich kleiner und weniger zusammenhängend als bei den Proben der Pro Seal® Versuchsreihe. In der Detailansicht (Abb. 33) war ein Übergang von sehr rauen, säurekonditionierten in einen flachen, abradierten Zahnschmelz zu sehen. Probe D15 (Abb. 34) zeigte noch punktuelle Reste der Versiegelung auf. In der Detailansicht (Abb.35) konnte ein wabenförmiger Zahnschmelzaufbau beschrieben werden.

Bei keiner thermomechanisch belasteten Versuchsprobe wurde die sehr charakteristische Struktur des Referenzmaterials beobachtet. Vielmehr ähnelten die Proben denen der unversiegelten Kontrollgruppe.

5. Ergebnisse

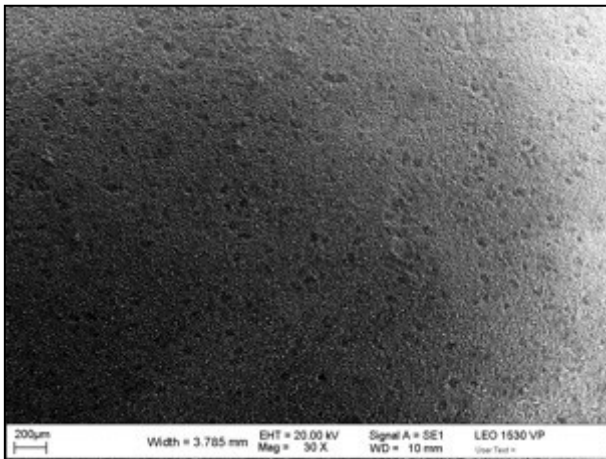


Abbildung 30: Referenzprobe Clearfil™ Protect Bond, 30x

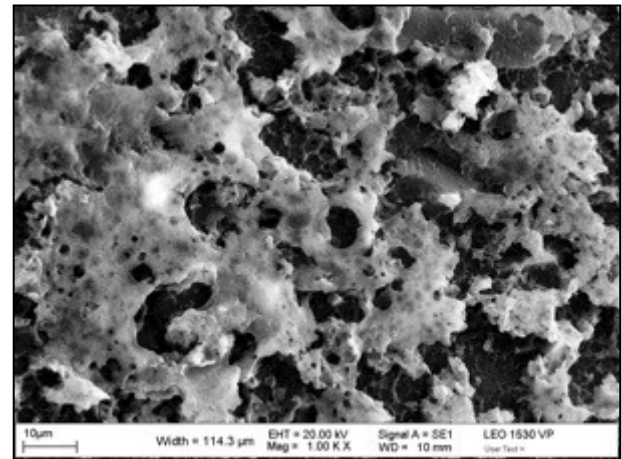


Abbildung 31: spongiöser Aufbau des Clearfil™ Protect Bond. Referenzprobe, 1000x

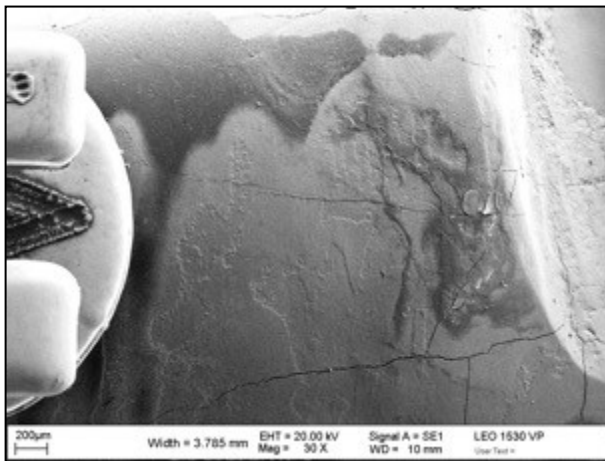


Abbildung 32: Oberer, linker Bereich mit zusammenhängender Versiegelung. Darunter freiliegender Schmelz mit Vertiefungen. Probe D7, 30x

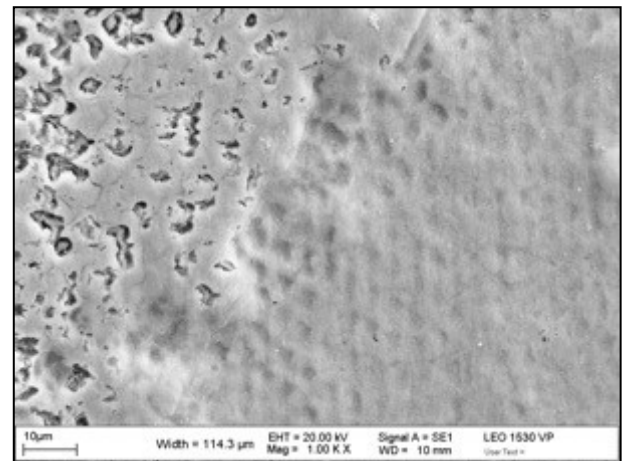


Abbildung 33: Übergangsbereich von säurekonditioniertem Schmelz links in abgeflachten Schmelz rechts. Probe D7, 1000x

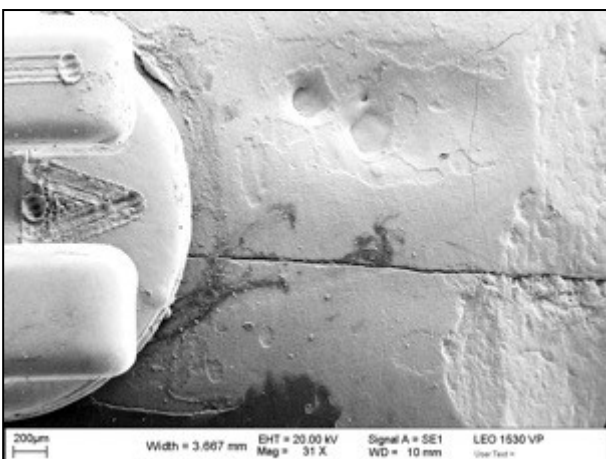


Abbildung 34: Freiliegende Schmelzoberfläche mit Einkerbungen oben, Rissbildung und Versiegelung am unteren Bildrand, Probe D15, 31x

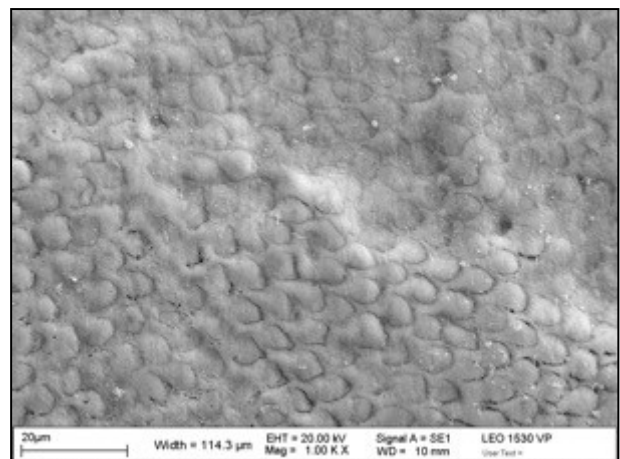


Abbildung 35: Freiliegende Schmelzoberfläche mit deutlicher Wabenstruktur. Probe D15, 1000x

5.2.8 Gruppe E (Ortho Solo™)

Die Referenzprobe des Materials zeigte in der Übersichtsaufnahme (Abb. 36) eine ungleichmäßige Benetzung der Oberfläche. Es zeigten sich sowohl dunklere Bereiche mit etwas glatterer, homogenerer Oberfläche, als auch hellere Zonen, welche rau und leicht erhaben erschienen. In Detailansicht (Abb. 37) zeigte sich ein lückenloser Überzug des Zahnschmelzes mit einer spongiosaähnlichen Struktur. Dieses zeigte sich feinporiger als jenes der Clearfil™ Protect Bond Versuchsreihe.

In Abb. 38 ist Testprobe E1 in der Übersicht dargestellt. Hierbei waren typische Imbrikationslinien und Retziusstreifen auf der freiliegenden Schmelzoberfläche zu erkennen. Es wurde keine Versiegelung nachgewiesen. In der Detailansicht (Abb. 39) zeigten sich typische oktaedrische Schmelzprismen in abgerundeter Form. Probe E14 (Abb. 40) zeigte ähnlich der Abbildung 38 die Ausprägungen der periodischen Schmelzbildung sowie markante Risse und Alterungserscheinungen. In der Detaildarstellung (Abb. 41) waren abgerundete Prismen zu erkennen. Zudem konnten einige Schmutzpartikel und vereinzelt kokkenförmige Bakterien beobachtet werden.

5. Ergebnisse

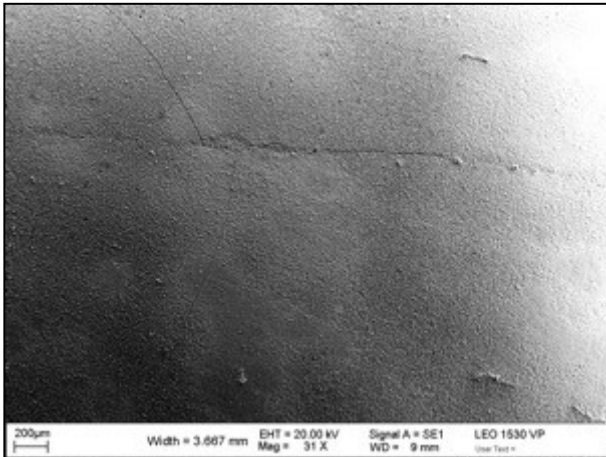


Abbildung 36: Unregelmäßige Bedeckung der Oberfläche. Ortho Solo™ Referenzprobe, 31x

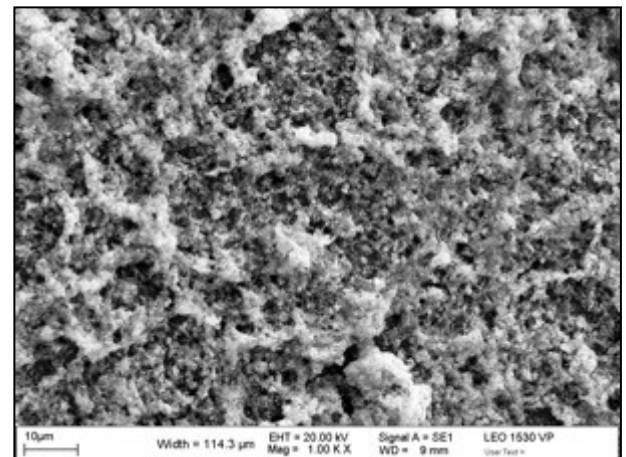


Abbildung 37: Leicht schwammartige Struktur der Ortho Solo™ Referenzprobe, 1000x

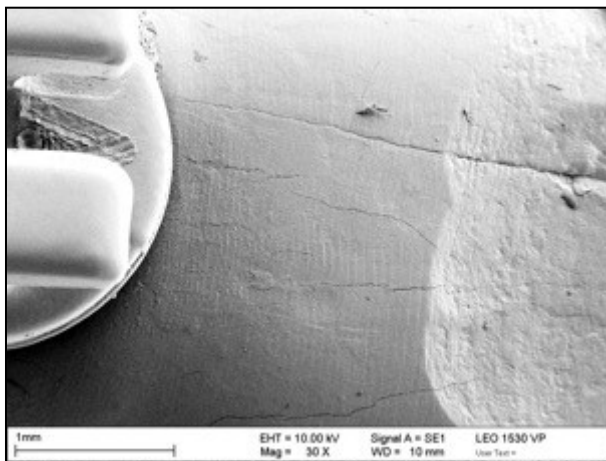


Abbildung 38: Versiegelerfreie Zahnoberfläche mit typischen Wachstumslinien. Probe E1, 30x

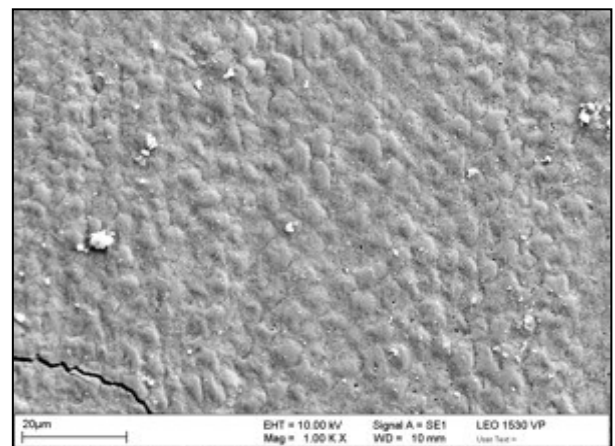


Abbildung 39: Freiliegender Zahnschmelz, abgerundet-oktaedrischen Schmelzprismen. Probe E1, 1000x

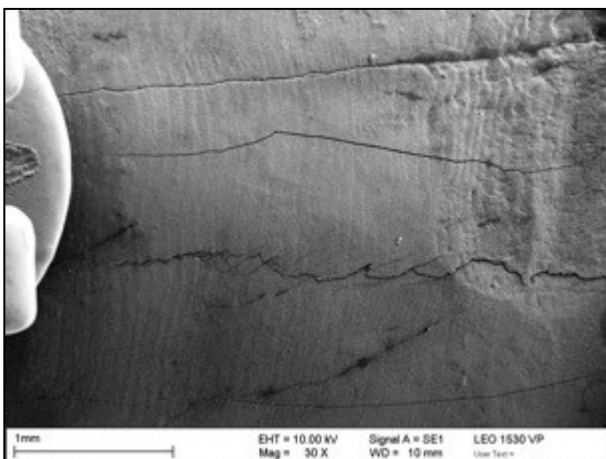


Abbildung 40: Wachstumslinien und diverse Schmelzrisse. Probe E14, 30x

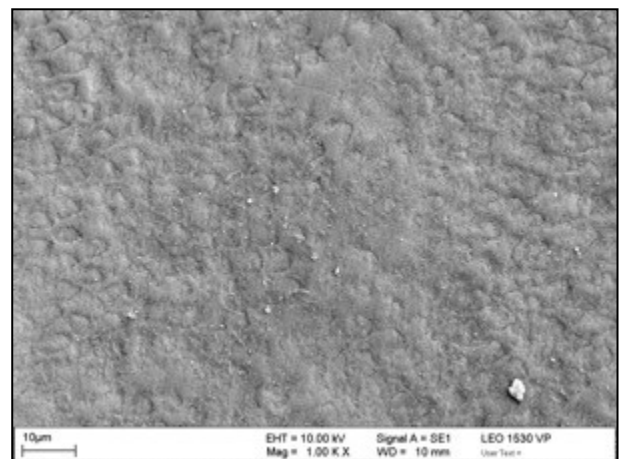


Abbildung 41: Schmelzoberfläche mit teilweise erkennbaren Schmelzprismen. Probe E14, 1000x

5.2.9 Gruppe F (Protecto® CaF₂ Nano)

Abb. 42 zeigt die Protecto® CaF₂ Nano Referenzprobe. Diese zeigte in der Übersichtsvergrößerung eine streifige und unregelmäßige Benetzung der Zahnoberfläche mit helleren und dunkleren Arealen. Zudem durchzog zentral ein markanter Riss die Probenoberfläche. In der Detaildarstellung (Abb. 43) zeigte sich im oberen Bildbereich ein vorwiegend glattes, dunkel coloriertes Areal. Dieses ging in einen helleren, unregelmäßigeren unteren Bereich über.

Abb. 44 zeigt Probe F5. Diese wies Attritionen auf einer vorwiegend glatten Schmelzoberfläche auf. In der Detailansicht (Abb. 45) zeigten sich abgerundete Schmelzprismen. Ähnliche Befunde ergaben sich bei Probe F15 (Abb. 46). Hier waren die Abnutzungserscheinungen noch ausgeprägter. Es zeigten sich Schmelzfrakturen mit sich überlappenden Bruchspalten. In eintausenfacher Vergrößerung (Abb. 47) konnte eine vorwiegend glatte Zahnoberfläche mit markanten Alterungserscheinungen beobachtet werden.

Keine der Proben zeigte eine Versiegelung. Die größten Ähnlichkeiten konnten zur unversiegelten Kontrollgruppe beschrieben werden.

.

.

5. Ergebnisse



Abbildung 42: Streifig- unregelmäßige Versiegelung der Oberfläche. Markanter Schmelzriss. Protecto® CaF₂Nano Referenzprobe, 30x

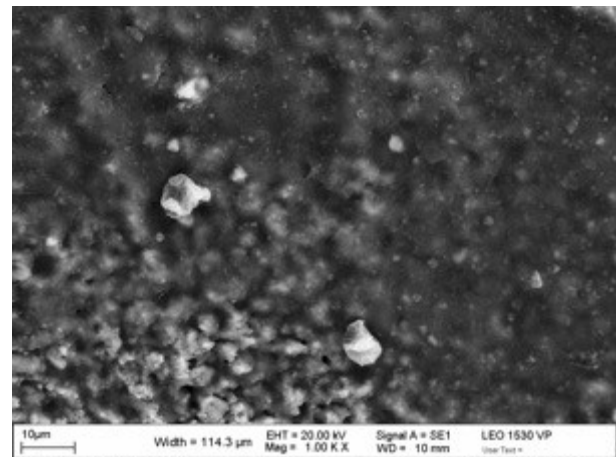


Abbildung 43: Versiegelte Zahnfläche und Füllkörper im oberen Bereich, darunter freiliegender Zahnschmelz, Protecto® CaF₂

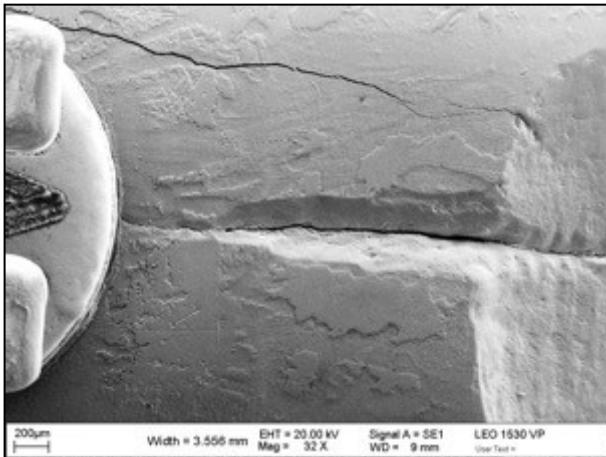


Abbildung 44: Markante Abrasionserscheinungen und Rissbildung auf freiliegendem Schmelz. Probe F5, 32x

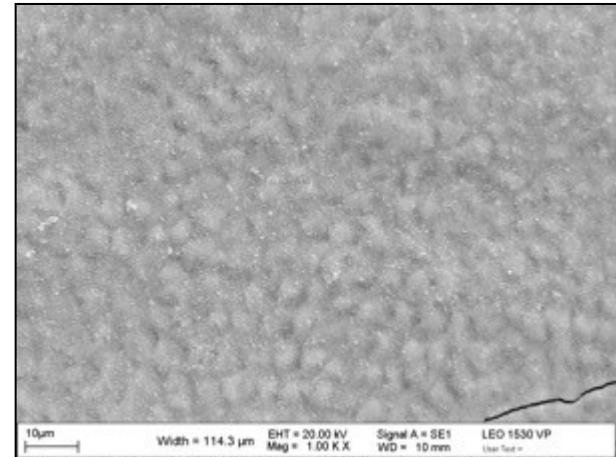


Abbildung 45: Zahnoberfläche mit abgerundeten Schmelzprismen. Probe F5, 1000x

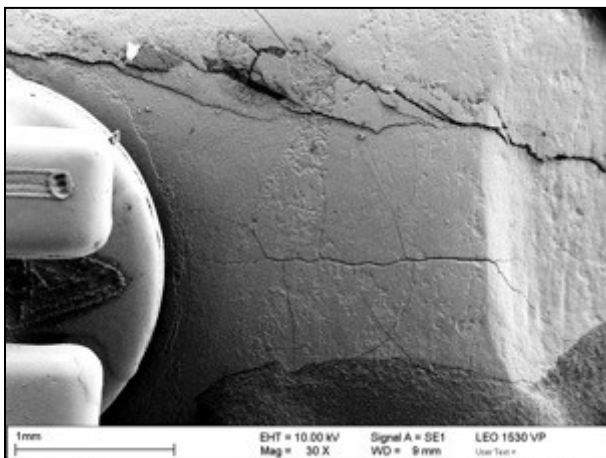


Abbildung 46: Schmelzfrakturen auf freiliegender Oberfläche. Probe F15, 30x

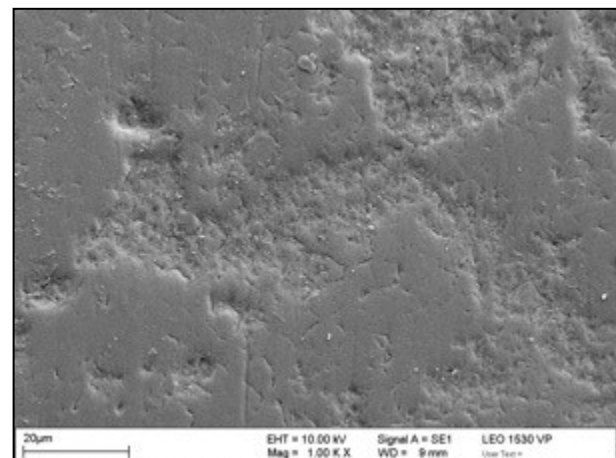


Abbildung 47: Glatte Zahnoberfläche, Kratzer und Abrasionserscheinungen. Probe F15, 1000x

5.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (REM) einer Pro Seal®-Lackoberfläche nach isolierter Pulver-Wasserstrahl Reinigung (PWS)

Abbildung 48 zeigt eine Zahnprobe, die zum Zeitpunkt T4 im Nebenversuch zweimalig für jeweils 5s Calciumcarbonat-Wasser Gemisch besprüht wurde. Der Abstand zwischen Zahnoberfläche und Austrittsdüse der PROPHYpearls™ Apparatur wurde auf 5mm eingestellt. Abbildung 48 zeigt die Testprobe in 30-facher Vergrößerung. Es konnte eine deutliche Zunahme der Rauigkeit beobachtet werden. Durch die freiliegenden Füllkörper erschien die Oberfläche der Versiegelung heller. Risse durchzogen die weitgehend intakte Polymerdecke, welche punktuell im linken Bildrand freiliegenden Zahnschmelz aufwies. In der Detailansicht (Abbildung 49) stellten sich exponierten Füllpartikel unterschiedlicher Größe dar. Der Versiegler bedeckte die gesamte Zahnoberfläche durchgängig, in einer im Vergleich zur Referenzprobe (Abbildung 18)weniger glatten Schicht. Freiliegender Zahnschmelz wurde in diesem Bildausschnitt nicht beobachtet. Trotz der Zunahme der Rauigkeit bedeckte die Versiegelung durchgehend und gleichmäßig die Labialfläche des Zahnes. Ein kreisförmig freiliegender Bereich, wie er im Hauptversuch beschrieben wurde, war hier nicht entstanden.

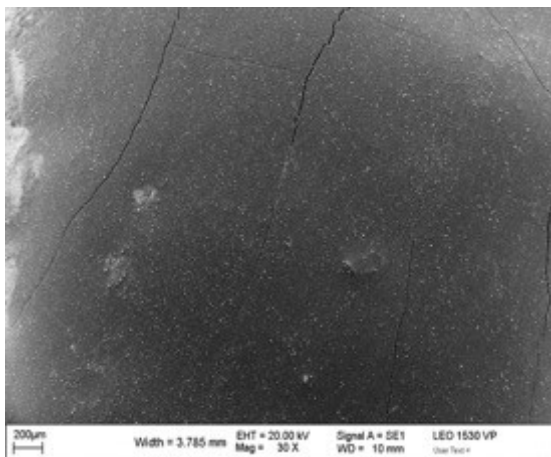


Abbildung 48: Pro Seal® nach PWS Testung, 30x

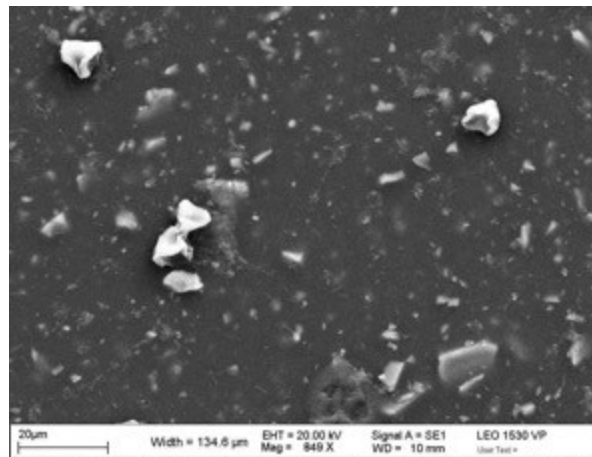


Abbildung 49: Pro Seal® nach PWS Testung, 849x

6. Diskussion

6.1 Relevanz der Studie

Gemäß den Ausführungen des Robert Koch Institutes befinden sich etwa die Hälfte der Jugendlichen in der Altersgruppe von 11-13 Jahren in einer kieferorthopädischen Behandlung [137]. Die Gesamtausgaben der gesetzlichen Krankenversicherungen für den Bereich Kieferorthopädie belaufen sich auf etwa 1,1 Milliarden Euro jährlich [26]. Weiterhin werden häufig sogenannte Selbstzahlerleistungen angeboten, die über den Rahmen der Krankenkassen hinausgehen und vom Patient selbst getragen werden müssen [26]. Hierunter fällt auch die Glattflächenversiegelung, welche die Entstehung von unerwünschten Demineralisationen verhindern soll. Studien zufolge entwickeln zwischen 23,4-72,9% der Patienten neue white spot Läsionen in Laufe ihrer Therapie mit festsitzender Multibracketapparatur [48,93,132]. Angesichts dieser hohen Inzidenz ist es zwingend erforderlich anhand von Studien zu evaluieren, ob postulierte Vorteile der Selbstzahlerleistungen wissenschaftlich fundiert sind.

6.2 Verwendete Materialien und Zeitraum der Untersuchung

Die vorliegende Studie untersucht 5 verschiedene Produkte, die häufig zum Schutz vor Demineralisation während der kieferorthopädischen Therapie eingesetzt werden. Pro Seal® ist der in Studien am häufigsten ausgewählte Glattflächenversiegler und kann so gewissermaßen als Standardprodukt der Glattflächenversiegelung angesehen werden [15,17,28,36,80,94,112,139].

Bei Light Bond™ handelt es sich um einen fluoridhaltigen kieferorthopädischen Haftvermittler. Er wurde für diese Studie ausgewählt, da es in der Praxis wirtschaftlich vorteilhaft wäre, wenn das Material, welches nur unterhalb der Bracketbasis aufgetragen wird auf die gesamte Labialfläche extendiert werden könnte. Bei mechanischer Beständigkeit würde dies einen zusätzlichen Glattflächenversiegler entbehrlich machen.

Clearfil™ Protect Prime+Bond ist ein zweiphasiges, selbstkonditionierendes Bondingsystem, dem zusätzlich die antibakterielle Verbindung 12-Methacryloyloxydodecyl Pyridinbromid (MDPB) beigelegt ist. Somit ist es als eine Art Hybrid aus Haftvermittler und bakteriolytischer Substanz zu sehen und soll

zusätzlich zur mechanischen Barriere auch die kariogene Aktivität direkt hemmen.

Bei Ortho Solo™ handelt es sich um ein wenig gefülltes, kieferorthopädisches Bonding, welches zugleich als Glattflächenversiegler fungieren soll. Bei mechanischer Beständigkeit würde so in einem einzeitigen Verfahren Versiegelung und Bracketplatzierung stattfinden können.

Protecto® CaF₂ Nano ist ein Fluoridlack, welcher ohne Säurekonditionierung einen Verbund zur Zahnoberfläche herstellen soll. Dadurch würde sich als klinisch vorteilhaft erweisen, dass das Produkt beliebig oft aufgetragen werden könnte. Hierbei würde keine Zahnhartsubstanz angeraut oder abgetragen werden müssen.

Zum Zeitpunkt T₀ wurden 120 kariesfreie, extrahierte Frontzähne in die Belastungssimulation gegeben. Nach der vollständigen Belastungssimulation (Zeitpunkt T₃) standen noch 78 Proben für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zur Verfügung. 42 Testproben wurden verworfen, da diese sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten von ihrer Basisplatte gelöst hatten. Die Fixierung mit Heißkleber (Pattex, Fa. Henkel, Düsseldorf, DE) auf Legosteinen (Fa. Lego, Billund, DK) sollte eine reproduzierbare Position aller Zahnproben während Belastungssimulation und Mikroskopie gewährleisten. Diese Methode zeigte sich im Vergleich zu einer Einbettung in Kaltpolymerisat, wie von anderen Autoren durchgeführt, somit als nachteilig [36,94]. Es gab 7 Probenverluste in der Kontrollgruppe, 6 in Gruppe B, jeweils 9 in Gruppe C und D, 5 in Testgruppe E, sowie 6 in Gruppe F.

In früheren Studien betrug die Probenanzahl häufig zwischen 10 und 20 Zähne pro Gruppe [1,36,80,100]. Diese zeigen stets individuelle Unterschiede bezüglich der Morphologie, Abnutzung, Alter und vorangegangene Behandlungen wie professionelle Reinigungen, Fluoridierungen oder kosmetische Aufhellungen [66]. Diese strukturellen Unterschiede sind vernachlässigbar, sofern die Probenanzahl größer als 10 ist [77]. Dies ist somit in der vorliegenden Studie gegeben.

Dennoch muss bei einer derart ausgeprägten Anzahl an Probenverlusten kritisch hinterfragt werden, in wieweit der Versuchsaufbau für die Studie geeignet war. An dentalen Füllungswerkstoffen, die als prothetisch-konservierendes Zahnersatzmaterial eingesetzt werden, werden häufig Studien zur mechanischen Belastbarkeit durchgeführt [57–60,111,133,145]. Demgegenüber finden sich weniger Informationen bezüglich des Abnutzungsverhaltens von Glattflächenversiegler

[28,36,49,80,94,112]. Es erscheint sinnvoll ein Polymer, welches in der Mundhöhle des Menschen Anwendung finden soll, zuvor präklinisch zu untersuchen [23]. Hierbei sollte, wie in der vorliegenden Studie, auf die intraoralen Belastungen eingegangen werden. Hierunter fallen die Kausimulation, mit den einhergehenden Temperaturschwankungen sowie die Lichtalterung, da diese bei Frontzähnen eine Rolle spielt [46]. Eine Testung der Zahnputzabrasion ist zudem unabdingbar [80]. Die professionelle Reinigung mittels Pulver-Wasser Strahl Apparaturen ist eine häufig durchgeführte Maßnahme in der kieferorthopädischen Praxis [49]. Der Verzicht auf eine dieser Testreihen wäre möglich und andere Autoren untersuchten lediglich einzelne Belastungen. Hierbei ist der Einfluss der Zahnputzabrasion am umfassendsten untersucht [28,49,80,94]. Dabei würde zugleich die Relevanz der Studie gemindert, da Kaufunktion, Alterungsprozesse sowie die Mundhygienemaßnahmen klinisch stets untrennbar auf die Versiegler Einfluss nehmen. Der Versuchsaufbau ist dementsprechend nah an der klinischen Situation gewählt.

Weiterhin dienten menschliche Zähne der Durchführung der Untersuchung. Auch hätten bovine Zahnschmelzproben herangezogen werden können. Die Verwendung dieser wird in der Literatur nicht unkritisch betrachtet: Studien, welche sich mit Haftkräften von verschiedenen Adhäsivsystemen beschäftigt haben, konnten teilweise keine Unterschiede zwischen den Spezies feststellen [101,120]. Andere Forschungsgruppen [111] fanden heraus, dass die Adhäsivkräfte zu bovinem Schmelz zwischen 21 und 44% schwächer waren als bei humanen Zähnen. So zeigte sich bei Studien zum Abnutzungsverhalten von Composite Materialien ein statistisch signifikant höherer Volumenverlust bei bovinen Proben als bei humanem Zahnschmelz [111]. Die Autoren postulierten, dass Rinderzähne nicht für in vitro Versuche geeignet seien. Dieser Aussage wird in der vorliegenden Studie Folge getragen.

Nach Extraktion wurden die Zähne in 0,1%iger Thymol Lösung aufbewahrt. Dadurch kann das Wachstum von Mikroorganismen verhindert werden, ohne die chemische Zusammensetzung der Zahnhartsubstanzen zu denaturieren [39]. Um die Keimbelastung zusätzlich zu minimieren wurden die Zahnwurzeln abgetrennt. Trotzdem musste von einem Restkeimbestand ausgegangen werden, der auch Einfluss auf die Oberfläche der Proben nehmen konnte. Bei einigen Zähnen wurde

eine organische Kolonisation beobachtet. Da keine Schichtstärkenmessung durchgeführt wurde, verändern derartige Nebenfunde das Ergebnis der Studie kaum. Der Einfluss von Glatflächenversiegler auf die Biofilmbildung ist weiterhin Gegenstand der kieferorthopädischen Forschung: So untersuchten Premaraj et al. zwei Versiegler (Pro Seal® und Opal™ Seal™) bezüglich der Bakterienadhäsion auf ihrer Oberfläche: Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten eine vermehrte Adhärenz von *S. mutans* an Pro Seal® als an der Oberfläche des Vergleichsproduktes [130].

Zur Simulation der intraoralen Situation wurden die Proben in der vorliegenden Studie in künstlichem Speichel (Fa. Apomix, Halle, DE) gelagert. Da die Versuchsreihen über einen Zeitraum von etwa 1,5 Jahren stattfanden, ist ein Einfluss dieser Lagerung auf die Ergebnisse nicht auszuschließen. So beschrieben Armstrong et al. eine verstärkte Polymerisationsschrumpfung durch Hydrolyse bei Lagerung der Proben in Wasser [3].

Bei der Positionierung der Brackets wurde darauf geachtet, dass kein Befestigungscomposite (Transbond XT, Fa. 3M Unitek, Landsberg, DE) auf den Messbereich austritt. Deshalb wurde jedes Bracket gleichartig erst auf dem Messbereich angedrückt und dann Kunststoffüberstände nach zervikal austreten gelassen. So konnte gewährleistet werden, dass der Bereich inzisal der Bracketbasis nur von Sealer bedeckt war. Die Polymerisation aller Produkte erfolgte in allen Versuchsgruppen nach Herstellerangaben. Der Einfluss unterschiedlicher Aushärtungszeiten ist zu vernachlässigen, da bei dem anschließenden Fixieren der Brackets erneut jede Probe eine Aushärtung von zwanzig Sekunden erfahren hat.

Die Verwendung von Brackets ist dabei auch bei in vitro Studien von großer Bedeutung, da diese das Abrasionsverhalten der Produkte, beispielweise durch unterschiedliche Zugänglichkeit bei der Zahnputztestung, verändern können [112].

Hinsichtlich auf die klinische Aussagekraft einer in vitro Simulation in den klinischen Alltag ist zudem die Wahl eines geeigneten Untersuchungszeitraumes. Dieser sollte so gewählt werden, dass er die durchschnittliche Behandlungsdauer mit festsitzender Apparatur repräsentieren kann. Fink und Smith [54] berechneten in ihrer Studie eine Tragedauer von 23,1 Monate. Weitere Autoren postulierten eine durchschnittliche Verweildauer von 25 Monaten [141]. Die vorliegende Arbeit berücksichtigte ebenfalls einen Zeitraum von 2 Jahren [28,94]. Labortechnische Studien, die sich mit der

Beständigkeit von Pro Seal® über einen dreimonatigen Zeitraum beschäftigten, zeigten vollständigen Schutz vor neuen Demineralisationen [36]. Eine derart kurze Therapiedauer wäre allerdings klinisch nicht zu erwarten.

6.3 Belastungssimulation

6.3.1 Künstliche Alterung

Das Thermocycling ist eine häufig durchgeführte Methode zur Testung des Alterungsverhaltens von Restaurationsmaterialien [119]. In einer Literaturübersicht von Morresi et al. [119] wurden 193 Studien von 1998 bis 2013 miteinander verglichen. Hierbei konnte kein Standardprotokoll für den Versuchsaufbau beschrieben werden. Häufige Gemeinsamkeit der Studien war die Temperatureinstellung, die häufig zwischen 5°C und 55°C lag [44,59,111]. Die größten Differenzen fanden sich in der Anzahl der Zyklen, in denen zwischen Wärme- und Kältebad gewechselt wurde. Diese variierten von 100 bis 100 000 Zyklen [109,118].

Die international Standards Organisation hat 1994 eine Anzahl von 500 Zyklen zur Testung von dentaler Adhäsionsmaterialien festgelegt [85]. Andere Autoren postulierten, dass diese Zahl nicht ausreichend sei [62]. So schätzten Stewardson et al.[143], dass 500 Wechselzyklen nur etwa 2 Monate realer Alterung im Mund entspricht. In der vorliegenden Studie wurden 2500 Zyklen gewählt. Die Eintauchdauer betrug je Temperaturwanne 30 Sekunden, gefolgt von je 15 Sekunden Abtropfzeit. Auch hier finden sich in der Literatur unterschiedliche Zeiten [119].

Andere Autoren gaben außerdem kritisch zu bedenken, dass ein natürlicher Zahn in vivo nur schätzungsweise 2-5 Sekunden den extremen Temperaturen ausgesetzt ist, ehe die Normaltemperatur wieder erreicht wird [135].

Die Auswirkung lichtinduzierter Alterung, welche bei Frontzähnen von Relevanz ist, wurde mittels der CPS plus Testkammer untersucht. Die kontinuierliche Beleuchtung bei 400 nm Wellenlänge durch die Xenonlampe emittierte 50 000 kJ/m². Dies entspricht einer Beleuchtungsstärke von 135 000 lux und simuliert so die Lichtexposition, die bei einem 30 täglichen Aufenthalt in Zentraleuropa zu erwarten ist. [25,46]. Der zweijährigen Simulationsdauer entsprechend, wurde die Belichtungsdauer auf insgesamt 584 h gesetzt. Die Temperatur der Proben wurden

mit Hilfe von ständigem Zu- und Ablauf von destilliertem Wasser auf 36°C gehalten.

6.3.2 Kausimulation

Durch das Zerkleinern fester Nahrungsbestandteile wird die Versiegelungsschicht mechanischem Stress ausgesetzt. Bezüglich der Versuchsparameter sind unterschiedliche Angaben in der Literatur beschrieben: In einem Versuchsaufbau nach Frankenberger et al. [59] zur Testung approximaler Füllungsflächen werden 100 000 Zyklen bei 50 N Gewichtsbelastung angewandt. Li et al. [99] untersuchten Klasse V Füllungen bei 100N und 25 000 Zyklen. Ehrenberg et al. [45] schlugen zur Testung dentaler Werkstoffe eine Kombination von Thermocycling und mechanischer Belastung vor: Die Autoren kombinierten 50 000 mechanische Zyklen, bei 40 N Belastung und einer Frequenz von 40 Hz mit 8000 Wechselbädern von 5°C nach 60°C. Damit sollten etwa 6-8 Wochen intraorale Alterung von provisorischen Restaurationen simuliert werden.

Neben einer unterschiedlichen Gewichtsbelastung weichen auch die Angaben zur Anzahl der vorgeschlagenen Versuchszyklen deutlich voneinander ab: So haben Mehl et al. [111] 240.000-250.000 Zyklen verwendet, um ein Jahr der intraoralen Situation bei prothetischen Verblendkunststoffen zu simulieren.

Für die Kaukräfte, im Frontzahnbereich auftreten wurden an Patienten Werte zwischen 60 und 170 N gemessen [53,56]. Mangels eines Standardprotokolls und ausgehend, dass nur ein Teil dieser Kraft über die Labialfläche ausgelenkt wird wurde in der vorliegenden Studie eine Gewichtsbelastung von 20 N bei 100 000 Zyklen festgelegt.

6.3.3 Putzsimulation

Produkte zur Glattflächenversiegelung müssen gegenüber der Zahnputzabrasion resistent sein. Diverse Studien haben sich mit der Zahnputzabrasion dentaler Füllungscomposites beschäftigt [9,131,153].

Buren et al. [28] verglichen Pro Seal® mit dem ungefüllten Produkt Delton (Fa. Dentsply, York, USA) und Fluor Protector (Fa. Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein).

Um zwei Jahre zu simulieren, wurden 15 000 Bürstenzyklen durchgeführt. Andere Autoren folgten dieser Anzahl [13,80,112].

In der vorliegenden Studie wurden ebenfalls 15 000 Zyklen ausgewählt. 2013 haben

Korbmacher-Steiner et al. [94] eine weitere Studie veröffentlicht: Pro Seal®, Light Bond™, Ortho Solo™ sowie der niedrig gefüllte Sealer Seal+Protect wurden bezüglich Zahnputzabrasion untersucht. Die Proben wurden von einem Zahnputzroboter, der mit einer Ladung von 300 g (2,94 N) arbeitet, 78 min lang belastet. Dadurch sollten 24 Monate in vivo Situation nachgeahmt werden. Es wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt: Das hochgefüllte Produkt Pro Seal® zeigte eine bessere Stabilität als das niedrig gefüllte Seal+Protect. Dennoch verzeichneten alle Proben Verluste in der Schichtstärke und wiesen Lücken mit freiliegendem Schmelz auf.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine in vitro Putzapparatur benutzt. Individuelle Putztechniken, Putzgewohnheiten oder eine etwaige Schutzwirkung durch Speichelpellikelbildung konnten hier nicht berücksichtigt werden.

Es wurde von täglich drei Putzvorgängen über einen Gesamtzeitraum von 24 Monaten ausgegangen. Das Zahnpasta-Wasser Gemisch wurde gemäß ISO/DIN 11609:2008-07 hergestellt und sofort nach der Herstellung verwendet. Dieses Mischverhältnis wurde auch in ähnlichen Studien benutzt [36,43].

6.3.4 Pulver-Wasserstrahl Reinigung

Die Effektivität der Pulver-Wasserstrahl Reinigung zur Entfernung von Plaque und Verfärbungen konnte nachgewiesen werden [149]. In der vorliegenden Studie wurde das PROPHYflex™ System (Fa. KaVo, Biberach an der Riß, Deutschland) mit dem Strahlmittel Calciumcarbonat eingesetzt. Dieses wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Zahnerhaltung der Universität Marburg ausgewählt.

Khalefa et al. [91] untersuchten die Wirkung verschiedener Strahlmittel auf die Oberflächenrauigkeit von Milchzähnen sowie boviner Zähne beider Dentitionen.

Dabei führte das PROPHYpearls™ (Calciumcarbonat) (Fa. KaVo, Biberach an der Riß, DE) Pulver zu signifikant ($p < 0,05$) mehr Rauigkeit und Abtrag als das AirFlow® Pulver Classic (Natriumbikarbonat) (Fa. EMS, Nyon, Schweiz) oder das ClinPro™ Prophy Powder (Glycin) (Fa. 3M Unitek Landsberg DE). Die Autoren raten von der Verwendung von PROPHYpearls™ wegen seiner zu hohen Abrasivität ab.

In einer Studie von Engel [49] wurde bereits allgemein von einer Pulver-Wasserstrahl Reinigung bei Patienten mit Glattflächenversiegelung abgeraten.

Als Strahlabstand wurden in der vorliegenden Studie ebenfalls 5 mm festgelegt. Es

wurde senkrecht zur Zahnoberfläche gestrahlt. Klinisch würde eine Strahlrichtung benutzt, die eher bei 60-80° zur Zahnoberfläche läge, um beispielsweise an einem eingesetzten Bogen vorbeistrahlen zu können [64]. In dem vorliegenden Versuch wurden die Zahnproben nicht bewegt. Der Legostein mit der jeweiligen Testprobe wurde stets auf der gleichen Stelle platziert. Dadurch sollte die gleiche Ausrichtung des Sprühkopfes gewährleistet werden. Engel [49] zeigte in ihrer Studie, dass auch ein weniger abrasives Strahlmittel wie Glycin zu einem Abtrag der Versiegelung führt. Es wurde weiterhin keine Kombination aus Glattflächenversiegler und Strahlmittel gefunden, die eine Unversehrtheit der Glattflächenversiegelung gewährleisten konnte. Nach 10 Sekunden, was laut Autoren einer realistischen Strahldauer entspräche, zeigten dort alle Zahnproben Defekte in der Schutzschicht [49]. Die Häufigkeit professioneller Reinigungen zur Vorbeugung von Entkalkungen sollte klinisch individuell festgelegt werden [155]. Bei einer 24-monatigen Behandlungsdauer wurde von zwei Reinigungszyklen ausgegangen.

6.4 REM und REM-EDX

Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop werden häufig verwendet um quantitative, vor allem aber qualitative Aussagen zur Oberflächenbeschaffenheit verschiedener dentaler Kunststoffe zu machen [6,31,41,59,87,94,113]. Weiterhin wurde durch frühere rasterelektronenmikroskopische Studien der Aufbau des humanen Zahnschmelzes untersucht [12,22,108].

So können Unebenheiten der Zahnoberfläche oder der Polymermatrix, Füllpartikel und Schmelzprismen dargestellt werden. Die energiedispersive Röntgenspektroskopie stellt darüber hinaus eine effiziente Möglichkeit dar, Oberflächen von Zahnhartsubstanzen auf die Verteilung chemischer Elemente zu untersuchen [4,34,147]. Hierbei werden die von den Zahnoberflächen reflektierten Strahlen detektiert. Aufgrund der für jedes chemische Element charakteristischen Strahlung kann so der Nachweis einzelner Elemente erbracht werden [6]. Das in der vorliegenden Studie angewandte Rasterelektronenmikroskop vermag es Elemente größer Ordnungszahl 4 (Beryllium) darzustellen. Die Informationstiefe lag bei etwa 1µm.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

6.5.1 Hypothese 1

In Hypothese 1 wurde von einem Unterschied zwischen den thermomechanisch belasteten Proben und ihrer Referenzprobe ausgegangen. Der optische Vergleich zwischen den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Testproben B-F mit ihren jeweiligen Referenzproben macht deutlich, dass jede Probe sich von ihrer Referenz unterscheidet. In der Pro Seal® Gruppe bedeckte eine homogene, dunkle Schicht die Oberfläche der unbelasteten Referenzprobe vollständig. In den Aufnahmen der thermomechanisch belasteten Proben zeigten sich Risse, Lücken und freiliegende Schmelzareale, welche aufgrund eines helleren Farbverlaufes und teilweiser Schmelzprismen identifiziert werden konnten. Häufig konnten auf der verbliebenden Polymerdecke freiliegende Quarzfüllkörper, welche im Gegensatz zur Referenz nicht unter einer Sealerschicht bedeckt waren, beobachtet werden. Versuchsgruppe B (Pro Seal®) zeigte dennoch die größte Resistenz aller Gruppen, wenngleich nicht von einer vollständigen mechanischen Beständigkeit gesprochen werden kann.

Die Referenzprobe der Gruppe C (Light Bond™) zeigte sich zu Beginn bereits als helle, inhomogen wirkende Oberfläche. Die dazugehörigen Versuchsproben unterschieden sich nach der Belastung hiervon, da das Erscheinungsbild der Referenzoberfläche bei keiner Probe mehr beschrieben werden konnte.

Die Aufnahmen der Gruppe D (Clearfil™ Protect Bond) unterschieden sich ebenfalls von ihrer Referenzaufnahme: Diese zeigte eine heterogen erscheinende, unebene Schicht unterschiedlicher Hell- und Dunkelabstufungen, welche die Zahnoberfläche zugleich lückenlos bedeckte. Abweichend hierzu fanden sich bei den belasteten Proben noch Anteile dieser Schicht, diese waren aber sehr stark auf einzelne Flächen reduziert. Ein weitaus größerer Anteil zeigte durch hellere Oberflächen, Schmelzprismen und Risse den Aufbau von humanem Zahnschmelz.

In der Ortho Solo™ Gruppe konnte ebenfalls eine Abweichung der Testproben von der Referenzaufnahme beobachtet werden. Zeigte die Referenz noch eine inhomogene Bedeckung der Oberfläche, so erschienen die belasteten Proben nahezu frei von jeglicher Polymerbedeckung.

Schließlich zeigte auch Gruppe F (Protecto® CaF₂ Nano) visuelle Unterschiede zwischen Referenzaufnahme, mit einer streifig- unregelmäßigen Bedeckung der

Oberfläche, und den hellen Zahnoberflächen der belasteten Testproben. Anhand grafischer Evidenzen zeigen alle Gruppen Abnutzungserscheinungen im direkten Vergleich mit ihrer Referenzaufnahme. Kein Sealer konnte als völlig abrasionsstabil beschrieben werden, wobei Pro Seal® die besten Ergebnisse, gefolgt von Clearfil™ Protect Bond lieferte. Alle übrigen Produkte können zugleich als nicht-abrasionsstabil angesehen werden.

Einhergehend mit der optischen Veränderung wurde auch eine Veränderung der nachgewiesenen Elemente auf den Probenoberflächen angenommen.

Spezifischer wird der Kohlenstoffanteil der Referenzgruppe höher sein, als jener der versiegelten Proben nach der Belastung, während die Anteile des Phosphors und Calciums höher sind. Zur Prüfung dieser Hypothese, sowie der weiteren Hypothesen der Arbeit, wurden aufgrund der kleinen Stichprobengrößen zwischen $N=3$ und $N=9$ nicht-parametrische Alternativverfahren der gängigen verteilungsgebundenen Analyseverfahren herangezogen. Im Falle der Hypothese 1 wurde der Mann-Whitney U-Test [106] genutzt, um Unterschiede zwischen den versiegelten Proben nach der Belastung und den unbelasteten Referenzproben zu prüfen.

Wie aus Tabelle 4 erkenntlich, verhalten sich die Mittelwerte für den Versiegler Pro Seal® erwartungsgemäß, das heißt im Vergleich zur Referenzprobe wurden bei den belasteten Proben niedrigere Werte für Kohlenstoff bei erhöhten Werten für Phosphor und Calcium nachgewiesen. Das Vorhandensein von Kohlenstoff dient hierbei als Nachweis des Versieglers, welcher Aufgrund seiner Eigenschaft als Polymer sich von Calcium und Phosphor des Zahnschmelzes abgrenzt. Letztere Elemente werden insbesondere in Studien zu De- und Remineralisationsvorgängen untersucht [4,34,147] und können somit als Nachweis für freiliegenden Zahnschmelz dienen. Da visuell eine Abnahme der Versiegelungsschicht beobachtet werden konnte, wurden auch die obigen Veränderungen in der Elementzusammensetzung erwartet. Der Mann-Whitney U-Test lieferte für alle chemischen Elemente der Gruppe B (Pro Seal®) signifikante Ergebnisse.

Im Falle des Light Bonds™ (Gruppe C) und des Clearfil™ Protect Bonds (Gruppe D) verhielten sich die Unterschiede der Mittelwerte des Phosphors hypothesenkonform, wohingegen die Messungen für Kohlenstoff und Calcium nicht in die erwartete Richtung liefen. Der Mann-Whitney U-Test konnte signifikante Ergebnisse für die Elemente der Gruppe C, nicht aber für Gruppe D aufzeigen.

Auf deskriptivem Level waren alle Unterschiede im Versiegler Ortho Solo™ (Gruppe E) wie erwartet, jedoch erreichte keiner der Vergleiche im Mann-Whitney U-Test Signifikanz.

Zuletzt wies Protecto® CaF² die erwarteten Unterschiede im Kohlenstoff und Phosphor auf, während der Unterschied der Calciumanteile entgegen der Hypothese verlief. Alle Vergleiche wurden hier im Mann-Whitney U-Test signifikant.

An dieser Stelle sei erneut auf den in der vorliegenden Arbeit exemplarischen Charakter der EDX Untersuchung verwiesen. Alle aufgestellten Hypothesen der Arbeit beziehen sich auf visuell-grafisch feststellbare Veränderungen sowie den chemischen Nachweis der Elemente. Es bedarf weiterer Untersuchungen mit größeren Stichprobengrößen, um für jedes untersuchte Element statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten und darüber hinaus parametrische Analysen wie t-test oder Varianzanalyse durchführen zu können.

Zusammenfassend kann also Hypothese 1 nur teilweise angenommen werden: Es gab eine Veränderung der chemischen Elemente, allerdings verhielt diese sich nicht immer hypothesenkonform und die Veränderung war nicht in jedem Falle statistisch signifikant.

6.5.2 Hypothese 2

Hypothese 2 postulierte einen Unterschied zwischen den thermomechanisch belasteten Proben und der unversiegelten Kontrollgruppe (Gruppe A). In der vorliegenden Studie wurde der unversiegelte Zahnschmelz der Kontrollgruppe ausschließlich nach den Belastungen untersucht. Generell konnte ein starker Alterungsprozess der Schmelzoberfläche festgestellt werden. Diese konnten bereits vor der Studie vorhanden gewesen sein, durch die Versuche hervorgerufen oder verstärkt worden sein. Entsprechend soll keine Aussage über die festgestellten Alterungserscheinungen der Gruppen getroffen werden. Dennoch konnten die Aufnahmen zur Unterscheidung zwischen Zahnschmelz und Polymerschicht herangezogen werden. In den Messungen der Kontrollgruppe wurde ein hoher Calcium- sowie Phosphatanteil nachgewiesen. Dieser diente bereits in anderen Studien als Nachweis von Zahnschmelz [113].

Der deutlichste Unterschied war zu den Proben der Gruppe B (Pro Seal®) zu erkennen. Bedingt durch die noch verbliebende, großflächige Bedeckung der Testproben ließen diese sich vom Zahnschmelz der Gruppe A abgrenzen. Auch

Gruppe D (Clearfil™ Protect Bond) unterschied sich durch die verbliebende Versiegelung von der Kontrollgruppe.

Alle übrigen Gruppen (C, E, F) wiesen hingegen eine nahezu vollständige Abnutzung des Produktes auf. Eine Unterscheidung zur Kontrollgruppe war hier auf Basis visueller-deskriptiver Methoden nicht mehr möglich. Allenfalls einzelne Punkte mit Restversiegelung differierten von der Kontrollgruppe.

Hypothese 2 postulierte zudem einen Unterschied in den gemessenen chemischen Elementen auf der Probenoberfläche zwischen den versiegelten Proben und der unversiegelten Kontrollgruppe nach Belastung. Zur Prüfung der Hypothese wurde als Alternative zur einfaktoriellen Varianzanalyse der Kruskal-Wallis Test als verteilungsfreies Verfahren herangezogen.

Der Kruskal-Wallis Test konnte für alle chemischen Elemente ein signifikantes Ergebnis berechnen. Für den Kohlenstoff ergab sich $H=15,97$ ($p=0,007$), für den Phosphor $H=13,06$ ($p=0,023$) und das Calcium $H=11,06$ ($p=0,05$).

Die Mehrfachvergleiche innerhalb des Kruskal-Wallis Tests zeigten signifikante Ergebnisse für die Versiegler Pro Seal® (Gruppe B) und Clearfil™ Protect Bond (Gruppe D) im Vergleich mit der Kontrollgruppe (Gruppe A), während die übrigen Produkte keinen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe aufwiesen.

Hypothese 2 kann somit für die Testprobengruppen B und D angenommen werden. Die Probenoberflächen von Pro Seal® und Clearfil™ Protect Bond wiesen optische Unterschiede zur Kontrollgruppe auf und die Verteilung der chemischen Elemente auf den Probenoberflächen unterschied sich signifikant von der Kontrollgruppe. Für die Proben, welche mit Light Bond™ (Gruppe C), Ortho Solo™ (Gruppe E), Protecto® CaF₂ Nano (Gruppe F) behandelt wurden, wird Hypothese 2 abgelehnt.

6.2.3 Hypothese 3

In Hypothese 3 wurde von einem grafischen Unterschied aufgrund unterschiedlicher mechanischer Beständigkeit innerhalb der Gruppen B-F ausgegangen. Hierbei zeigten sich erneut die größten Unterschiede in der Pro Seal® Gruppe (Gruppe B) zu den übrigen Gruppen: Nach der thermomechanischen Belastung war noch eine größtenteils intakte, dunkle Versiegelungsschicht vorhanden. Die mit Clearfil™ Protect Bond (Gruppe D) behandelten Proben konnten ebenfalls noch von den weiteren Gruppen differenziert werden: Im Vergleich zu Pro Seal® war die

verbliebene Versiegelung deutlich geringer und weniger zusammenhängend. Keine der untersuchten Clearfil™ Protect Bond Proben zeigte eine so großflächige Reststärke wie in Gruppe B (Pro Seal®). Neben den erkennbaren Unterschieden dieser beiden Gruppen zueinander, konnten diese auch klar von den Gruppen C, E und F abgegrenzt werden. Letztere zeigten eine nahezu vollständigen Abtrag der Versiegelung. Dadurch unterschieden sie sich optisch weder von der Kontrollgruppe (Hypothese 2 wurde im vorherigen Absatz bereits abgelehnt) und auch untereinander waren diese Proben nicht mehr einem bestimmten Glattflächenversiegler zuordnungsfähig.

Hypothese 3 postulierte darüber hinaus Unterschiede zwischen den Versiegler nach der thermomechanischen Belastung in den Anteilen der chemischen Elemente auf der Probenoberfläche. Zur Prüfung wurde erneut der Kruskal-Wallis Test durchgeführt.

In den deskriptiven Statistiken war zunächst zu erkennen, dass der Versiegler Pro Seal® (Gruppe B) nach Belastung mit $M=35,95$ ($SD=18,18$) den höchsten Anteil an Kohlenstoffs aufwies, während der Versiegler Ortho Solo™ (Gruppe E) mit $M=9,55$ ($SD=13,47$) den geringsten Anteil zeigte.

Bezüglich des Nachweises von Phosphor zeigte sich in der Light Bond™ Gruppe (Gruppe C) mit $M=14,05$ ($SD=0,83$) der höchste und in der Pro Seal® Gruppe (Gruppe B) mit $M=6,20$ ($SD=9,34$) die geringsten Werte.

In der Verteilung des Calciums zeigte Pro Seal® mit $M=17,47$ ($SD=28,86$) zudem den geringsten Wert, während der Versiegler Protecto® CaF₂ Nano (Gruppe F) mit $M=29,27$ ($SD=1,86$) den höchsten Wert aufwies.

Der Kruskal-Wallis Test konnte für die Verteilung der Elemente Kohlenstoff ($H=13,45$; $p=0,009$) und Phosphor ($H=11,35$; $p=0,023$) signifikante Werte berechnen, während die Unterschiede zwischen den Versiegler in den Calciumanteilen mit $H=9,16$ ($p=0,057$) gerade keine Signifikanz mehr erreichte.

Anhand der Ergebnisse kann weiterhin entnommen werden, dass sich die Versiegler Pro Seal® (Gruppe B) und Clearfil™ Protect Bond (Gruppe D) in keinem der Elemente signifikant voneinander unterschieden.

Selbiges galt für das Verhältnis der drei Versiegler Light Bond™ (Gruppe C), Ortho Solo™ (Gruppe E) und Protecto® CaF₂ Nano (Gruppe F) zueinander. Im Vergleich der Gruppe B oder Gruppe D mit einem Produkt der Gruppe C, E oder F fand sich

immer mindestens ein signifikanter Unterschied in einem der Elemente.

Bezüglich der Aussage der Hypothese kann also zusammengefasst werden, dass es optische Unterschiede zwischen Gruppen B und D zueinander und zu den übrigen Gruppen gab. Innerhalb der Gruppen C, E und F konnte hingegen nicht differenziert werden. Weiterhin fanden sich statistisch signifikante Unterschiede in dem Vorkommen der chemischen Elemente zwischen den Gruppen B und C,E,F sowie D und C,E,F. Vergleiche der Gruppen B mit D, sowie C, E und F miteinander waren nicht signifikant. Hypothese 3 kann somit nur zum Teil angenommen werden.

Schlussfolgernd aus allen drei Hypothesen lässt sich also eine Überlegenheit des Pro Seals® (Gruppe B) gegenüber allen anderen Produkten erkennen. So zeigten sich im Vergleich zur Referenzprobe die geringsten Abnutzungserscheinungen (Hypothese 1), im Vergleich zum Zahnschmelz der Kontrollgruppe die größten Unterschiede (Hypothese 2) und die größte mechanische Belastbarkeit aller getesteten Produkte (Hypothese 3).

Die im Vergleich zu anderen Materialien erhöhte Resistenz gegenüber thermomechanischer Belastung der Pro Seal® Testgruppe, findet sich in der Literatur bestätigt [31,36,94]:

Buren et al. [28] testeten den Einfluss der Zahnputzabrasion auf Glattflächenversiegler mit Hilfe eines speziellen Zahnputzroboters. Dieser simulierte mit 15 000 Bürstenzyklen eine 2-Jahres Abrasion. Die Proben wurden anschließend für einen Zeitraum von 96 Stunden einer Demineralisationslösung mit pH 4,4 ausgesetzt. Pro Seal® zeigte anhand von Fotos und Lichtmikroskopie eine Reduktion der Schmelzdemineralisation um 92% und somit signifikant bessere Ergebnisse als ein ungefülltes Vergleichsprodukt (Delton®) oder der Fluoridlack Fluor Protector (Delton® 72%, Fluor Protector 47% Reduktion) [28].

Andere Autoren [80] bestätigten diese Ergebnisse, indem sie die gleichen Produkte zusätzlich nach der Zahnputzabrasion Mikrohärtetestungen und einem 14-tägiges pH Cycling aussetzten, um hierbei Entkalkungen zu induzieren. Auch hierbei postulierten die Autoren die Überlegenheit von Pro Seal®.

In der Vorliegenden Studie sollte weiterhin in einem Nebenversuch der Einfluss der isolierten Behandlung mit PROPHYpearls™ Calciumcarbonatpulver untersucht werden. Bei den Proben, welche die gesamte thermomechanische Belastung

durchlaufen haben, war ein kreisrunder Abtrag des Materials, welche eine freiliegende Schmelzoberfläche zur Folge hatte, zu erkennen. Daher sollte exemplarisch eine zusätzliche Probe ausschließlich mit Pulver Wasserstrahl Reinigung belastet werden und anschließend rasterelektronenmikroskopisch betrachtet werden. Hierbei zeigte sich kein vollständiger Abtrag, vielmehr führte die Belastung visuell zu einer deutlichen Zunahme der Rauigkeit der Lackoberfläche von Pro Seal®, welche an den hellen, freiliegenden Füllkörpern auf der Oberfläche des Materials zu erkennen waren.

Auch Engel et al. [49] beschäftigten sich mit dem Einfluss der Behandlung mit Pulver Wasserstrahl Reinigungen auf Glattflächenversiegler, wie in der Literaturübersicht der vorliegenden Arbeit beschrieben. Neben der Überlegenheit des Pro Seal® gegenüber anderen Produkten weisen Engel et al. [49] darauf hin, dass keines der Produkte vollständig abrasionsstabil war und raten generell von der Pulverstrahlreinigung ab. In der vorliegenden Studie wurde sowohl im Haupt- als auch im Nebenversuch Calciumcarbonatpulver als Strahlmittel eingesetzt. Gemäß den Beobachtungen von Engel et al. [49] hätte die Verwendung von Glycinpulver als einziges Strahlmittel einen geringeren Abtrag erwarten lassen. Ein weniger abrasives Strahlmittel könnte klinisch hingegen mit einer längeren Applikationsdauer einhergehen. Weitere Studien sind notwendig, um den Einfluss der verschiedenen Strahlmittel zu untersuchen. Aufgrund der Beobachtungen in der vorliegenden Studie schließen sich die Autoren den Schlussfolgerungen von Engel et al. an und empfehlen den Verzicht auf den Einsatz von Pulver Wasserstrahl Geräten auf Glattflächenversiegelungen.

Bei der Bewertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Pro Seal® Gruppe fiel zunächst auf, dass der Großteil der Zahnoberfläche auch nach Belastung noch durch das Produkt bedeckt war. Im Vergleich zur unbelasteten Referenzprobe erschienen diese allerdings als deutlich inhomogener, rauer und trugen vermehrt exponierte Füllkörperpartikel auf ihrer Oberfläche. Wie vorhergehend erwähnt findet sich in der Literatur bestätigt, dass Materialien mit höherem Füllkörperanteil solchen mit geringem oder keinem Füllkörper aufgrund mechanischer Eigenschaften vorzuziehen sind [28]. Bebbber et al. [13] beschäftigten sich mit der Frage, ob eine Erhöhung des Füllpartikelanteils in der Polymermatrix zu einer verstärkten Abrasionsbeständigkeit führen würde: Hierbei wurden 120 Zahnproben nach

Herstellerangaben mit Pro Seal® versiegelt. Dabei wurde neben dem auf dem Markt erhältlichen Produkt, welches 18% Füllkörper enthält auch ein speziell für die Studie bereitgestelltes Produkt mit 30%, sowie eines mit 50% verwendet. Die sonstige Zusammensetzung von Pro Seal® blieb unverändert. Die Autoren führten Zahnputzabrasionstestungen mit 15 000 Bürstenzyklen durch. Dabei zeigte das Produkt in seiner 18% füllkörperhaltigen Originalzusammensetzung die größte Beständigkeit. Den größten Verlust zeigte das zu 50% gefüllte Produkt. Bebbert et al. [13] folgerten daraus, dass in die organische Polymermatrix nur eine gewisse Anzahl an Füllpartikeln eingebettet werden könne. Darüber hinaus findet eine Übersättigung statt, welche die mechanischen Eigenschaften des Sealers verschlechtert. Eine bloße Erhöhung der Füllkörperpartikel ist dementsprechend nicht als Lösungsansatz zur Verbesserung der Versiegelungen anzusehen [13].

Pro Seal® zeigte somit in der vorliegenden Studie, sowie in vorherigen Untersuchungen anderer Autoren, eine gewisse Überlegenheit bezüglich dem mechanischen Abnutzungsverhaltens. Weitere, insbesondere klinische Studien sind hierbei erforderlich, um den routinemäßigen Einsatz des Materials zu rechtfertigen (siehe Kapitel 5.6).

Der selbstkonditionierende Sealer Clearfil™ Protect Bond zeigte im Vergleich zu seiner Referenzprobe große Abnutzungserscheinungen (Hypothese 1), im Vergleich zum Zahnschmelz der Kontrollgruppe noch signifikante Unterschiede (Hypothese 2) und die zweitgrößte mechanische Belastbarkeit aller getesteten Produkte (Hypothese 3). Im Vergleich zur Pro Seal® waren die mechanischen Eigenschaften des Produktes allerdings sehr deutlich nachrangig. In der mit Pro Seal® behandelten Gruppe konnte eine größtenteils intakte Versiegelung beobachtet werden, wobei der Anteil in der Clearfil™ Protect Bond Gruppe größtenteils abgetragen war. Bezüglich der chemischen Verteilung der Elemente auf der Probenoberfläche unterschied sich das Produkt dennoch signifikant von den übrigen Gruppen des Versuches.

Die vorliegende Studie kann keine Aussage über die antibakteriellen Eigenschaften des Produktes machen. Als Nebentbefund konnte aber beobachtet werden, dass bei solchen Testgruppen, welche noch Versiegelungen aufwiesen, eine verstärkte Akkumulation von Mikroorganismen und organischer Besiedlung stattfand. Hierbei traten visuell in der Pro Seal® Testreihe mehr in Organismen in Erscheinung als in der des Clearfil™ Protect Bond.

Imazato et al. [83] bestätigten in vitro, dass das in Clearfil™ Protect Bond enthaltene 12 Methacryloyloxydodecylpyrimidin Bromid (MDPB) starke antimikrobielle Eigenschaften gegenüber *S. mutans*, *L. casei*, und *A. naeslundii* aufweist. Klinisch wäre somit zu überprüfen, welchen Stellenwert die intakte Versiegelungsschicht der Pro Seal® Testreihe im Vergleich zu einer antimikrobiellen Eigenschaft der Clearfil™ Protect Bond Gruppe in Bezug auf kariogener Prozesse einnimmt. Konkret hieße das: Wie viel Materialverlust eines Sealers kann durch seine chemischen Eigenschaften ausgeglichen werden, um einen ausreichenden Schutz vor Demineralisationen zu gewährleisten? Da der überwiegende Anteil der Zähne allerdings frei von Versiegelung war, scheint eine Anwendung des Produktes klinisch weniger sinnvoll.

Die verbliebenen Produkte der Studie, das kieferorthopädische Bondingmaterial, das Universalprodukt Ortho Solo™, sowie der Fluoridlack Protecto CaF₂ Nano zeigten bereits in den Referenzaufnahmen unregelmäßige Versiegelungen der Oberfläche. Nach der thermomechanischen Belastung zeigten sich im Vergleich zu den jeweiligen Referenzproben ein vollständiger Abtrag des Produktes (Hypothese 1). Durch den darunter liegenden, dadurch freiliegenden Zahnschmelz zeigten sich die größten Gemeinsamkeiten mit der Kontrollgruppe (Hypothese 2) und es kann von einer nicht vorhandenen mechanischen Belastbarkeit gegenüber der angewandten Verfahren gesprochen werden (Hypothese 3). Die Produkte unterschieden sich in ihrer mechanischen Belastbarkeit signifikant von Gruppe B (Pro Seal®) und D (Clearfil™ Protect Bond). Durch die vollständige Abnutzung der Versiegelung unterschieden sich die drei Produkte untereinander nicht signifikant.

Im Vergleich mit der Kontrollgruppe (A) waren dennoch die Rissbildungen und Abnutzungserscheinungen hier weniger stark ausgeprägt. Dabei kann es sich möglicherweise um einen Zufallsbefund handeln. Denkbar ist aber auch eine zumindest teilweise Schutzwirkung vor Schmelzfrakturen und mechanischen Angriffen. Da weder Aufnahmen der Kontrollgruppe ohne Belastungssimulation noch Aufnahmen nach einzelnen Belastungen der Versuchsgruppen B-F angefertigt wurden, kann diese Frage nicht abschließend beantwortet werden. Für die klinische Anwendung bleibt Light Bond™ allerdings als Haftvermittler für den Bereich unterhalb der Bracketbasis beschränkt. Eine Erweiterung auf die gesamte Labialfläche muss abgelehnt werden, da die mechanischen Eigenschaften sich in der

vorliegenden Studie als nicht ausreichend zeigten. Die fehlende Belastbarkeit des Light Bond TM findet sich in den Ausführungen von Korbmacher-Steiner et al. [94] bestätigt.

Eine Studie von Bechtold et al. [14] bestätigt die fehlende Schutzwirkung des Produktes in vivo.

Der starke Materialverlust in der Ortho Solo TM wurde bereits von Korbmacher-Steiner et al. [94] beschrieben und von den Autoren auf den geringen Anteil an Füllkörpern in ihrer Polymermatrix zurückgeführt.

Der Fluoridlack Protecto® CaF₂ Nano zeigte zu Beginn eine streifenartige Bedeckung der Schmelzoberfläche. Nach der Belastungssimulation konnte diese erwartungsgemäß nicht mehr beobachtet werden. Zurückzuführen ist dies darauf, dass das Material keine mechanische Barriere mittels Polymerschicht auf der Zahnschmelzoberfläche ausbildet. Vielmehr soll eine Schutzwirkung durch die chemische Umwandlung von Calciumhydroxylapatit in das säureresistentere Fluorapatit stattfinden [138]. Weiterhin konnte durch die durchgeführte energiedispersive Röntgenspektroskopie kein Nachweis von Fluorid auf der Probenoberfläche erbracht werden. In einer Studie von Melo et al. [113] zur Fluoridabgabe nanogefüllter Composite Materialien an das direkte Bracketumfeld wurden ebenso keine oder sehr geringe Fluoridwerte gemessen.

Es bleibt anzumerken, dass die Anwendung des Fluoridlackes Protecto CaF₂ Nano keine Säurekonditionierung der Oberfläche voraussetzt. Demnach ist es das einzige vollständig nichtinvasive Verfahren der vorliegenden Arbeit und kann während der kieferorthopädischen Behandlung mehrfach wiederholt werden. Hierbei bedarf es hier weiterer Untersuchungen, in welchem Ausmaß eine Schutzwirkung durch Ausbildung von Fluorapatit erwartet werden kann.

6.6 Klinische Relevanz und Ausblick

Die vorliegende Studie untersucht die Einwirkungen natürlicher Belastungen auf Glattflächenversiegler mit Hilfe eines in vitro Modells. Dieses kann, ebenso wenig wie die Ergebnisse daraus, nicht vollständig in den klinischen Alltag übertragen werden. Bei allen getesteten Produkten wurde ein gewisser Materialabtrag beobachtet. Eine Anwendung am Patienten ist denkbar, von einer vollständigen Resistenz sollte aber auch bei dem leistungsstärksten Glattflächenversiegler der Studie (Pro Seal®) nicht gesprochen werden. Der Versuchsaufbau wurde komplex gestaltet, da auch im klinischen Alltag Kauvorgänge, Mundhygienemaßnahmen und Alterung des Materials untrennbar miteinander verbunden sind.

Von labortechnischen Studien ist zu fordern, dass diese Gegebenheiten stets in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. Nur dann können diesen eine klinische Relevanz zugesprochen werden. Weiterhin bedarf es der Etablierung eines Standardprotokolls zur Prüfung kieferorthopädischer Werkstoffe. Dieses muss zugleich einen adäquaten Zeitrahmen abbilden. Aus Studien, die lediglich wenige Monate simulieren, können kaum Rückschlüsse in den klinischen Behandlungsalltag gezogen werden.

Die Glattflächenversiegelung stellt derzeit eine Möglichkeit der Kariesprophylaxe in der Kieferorthopädie dar, welche nie ausschließlich, sondern stets in Kombination mit anderen Methoden Anwendung finden sollte.

Bei der Entwicklung neuer Materialien bedarf es zugleich weiterer Ansätze, in wieweit diese sich positiv auf die Remineralisation der Zahnhartsubstanzen, dem Erhalt der parodontalen Gesundheit und der Verminderung kariesbildender Bakterien auswirken können.

Bevor von einer tatsächlichen Schutzfunktion gesprochen werden darf, müssen anschließend klinische Studien durchgeführt werden, welche die tatsächliche mechanische Beständigkeit der Glattflächenversiegler während der Multibracketbehandlung bestätigen.

7. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit: White Spot Läsionen sind eine mögliche, unerwünschte Nebenerscheinung bei der Behandlung mit festsitzenden Apparaturen. Die Glattflächenversiegelung stellt ein von der Mitarbeit des Patienten unabhängiges, klinisches Vorgehen dar, welches Demineralisationen vorbeugen soll. Ziel dieser in vitro Arbeit war es fünf Glattflächenversiegler auf ihre thermomechanische Beständigkeit zu untersuchen.

Material und Methode: 125 humane Front- und Eckzähne wurden randomisiert in 6 Versuchsgruppen eingeteilt: Dabei dienten 20 Zähne als unversiegelten Kontrollgruppe (Gruppe A). Alle übrigen Zähne wurden in die Gruppen B: Pro Seal® (Fa. Reliance Orthodontics), C: Light Bond™ (Fa. Reliance Orthodontics), D: Clearfil™ Protect Bond (Fa. Kuraray), E: Ortho Solo™ (Fa.Ormco) sowie Gruppe F: Protecto® CaF₂ Nano (Fa. BonaDent) aufgeteilt. Je eine Zahnprobe der Gruppen B-F diente der Anfertigung von unbelasteten Referenzaufnahmen des jeweiligen Materials. Die übrigen Proben wurden einem simulierten, zweijährigen Abnutzungs- und Alterungsprozess bestehend aus künstlicher Alterung durch Thermocycling und Lichtexposition, Kausimulation in einem Kausimulator, Zahnputzsimulation in einem Putzroboter, sowie Pulver-Wasserstrahl Reinigung mit Calciumcarbonatpulver unterworfen. Die Oberflächenbeschaffenheit der Testproben wurde mit Hilfe rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) quantitativ und qualitativ untersucht. Die Statistische Auswertung erfolgte mittels Mann-Whitney U-Test oder Kruskal-Wallis Test ($\alpha=0,05$)

Ergebnis: Die mit Pro Seal® (Gruppe B) versiegelten Proben zeigten die größte mechanische Belastbarkeit mit den geringsten Substanzverlusten aller Gruppen. Bereits deutlich größere Defekte wurden bei Gruppe D: Clearfil™ Protect Bond beobachtet. Bei allen übrigen Gruppen wurde ein nahezu vollständiger Versiegelungsabtrag festgestellt. Weiterhin war kein untersuchter Glattflächenversiegler in der Lage, den mechanischen Belastungen vollkommen standzuhalten.

Schlussfolgerung: Basierend auf den Beobachtungen der vorliegenden Studie lässt sich die Glattflächenversiegelung als eine Möglichkeit der Kariesprophylaxe beschreiben, welche nie ausschließlich, sondern stets in Kombination mit anderen

Methoden Anwendung finden sollte. Es bedarf weiterer in vitro und in vivo Studien, welche die mechanische Belastbarkeit der Glatflächenversiegler untersuchen und den Indikationsbereich der Glatflächenversiegelung im Kontext der kieferorthopädischen Kariesprophylaxe festlegen.

8. Summary

Objectives: White spot lesions are a possible undesirable side effect of orthodontic treatment with fixed appliances. Smooth surface sealing is a clinical procedure independent of the patient's cooperation, which is intended to prevent demineralisation. The aim of this in vitro study was to examine five sealers for their thermomechanical wear resistance.

Material and method: 125 human anterior and canine teeth were randomly divided into 6 testing groups: 20 teeth served as unsealed control group (group A). All other teeth were equally divided into group B: Pro Seal® (Reliance Orthodontics), C: Light Bond™ (Reliance Orthodontics), D: Clearfil™ Protect Bond (Kuraray), E: Ortho Solo™ (Ormco) and Group F: Protecto® CaF₂ Nano (BonaDent). One tooth sample of each of the groups B-F served as reference, that didn't undergo any mechanical testing. The remaining samples were subjected to a simulated two-year wear and aging process consisting of artificial aging by thermocycling and light exposure, chewing simulation in a chewing simulator, tooth brushing simulation in a brushing robot, and powder water jet cleaning with calcium carbonate powder. The surface quality of the test samples was investigated quantitatively and qualitatively by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX). Statistical evaluation was carried out using the Mann-Whitney U-test or Kruskal-Wallis test ($\alpha=0.05$)

Results: The samples sealed with Pro Seal® (group B) showed the highest mechanical wear resistance with the lowest substance loss of all groups. Significantly larger defects were already detected in the Clearfil™ Protect Bond group (group D). With all other smooth sealants, a near complete loss of the sealing was observed. Furthermore, no investigated smooth surface sealant was able to completely withstand the mechanical stress.

Conclusion: Based on the observations of the present study, the application of a smooth surface sealant can be considered as one option of caries prophylaxis, which should not be used exclusively but always in combination with other methods. Further in vitro and in vivo studies are needed to investigate the mechanical wear resistance of the smooth surface sealants and to determine the indication area of smooth surface sealing in the context of orthodontic caries prophylaxis.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Adriaens ML, Dermaut LR, Verbeeck RM. The use of “Fluor Protector”, a fluoride varnish, as a caries prevention method under orthodontic molar bands. *Eur J Orthod* 1990;12:316–9.
- [2] Alexander SA, Ripa LW. Effects of Self-Applied Topical Fluoride Preparations in Orthodontic Patients. *Angle Orthod* 2000;70:424–30.
- [3] Armstrong SR, Keller JC, Boyer DB. The influence of water storage and C-factor on the dentin-resin composite microtensile bond strength and debond pathway utilizing a filled and unfilled adhesive resin. *Dent Mater* 2001;17:268–76.
- [4] Arnold WH, Gaengler P. Quantitative analysis of the calcium and phosphorus content of developing and permanent human teeth. *Ann Anat* 2007;189:183–90.
- [5] Artun J, Brobakken BO. Prevalence of carious white spots after orthodontic treatment with multibonded appliances. *Eur J Orthod* 1986;8:229–34.
- [6] Asaka Y, Miyazaki M, Aboshi H, Yoshida T. EDX fluorescence analysis and SEM observations of resin composites. *J Oral Sci* 2004;46:143–8.
- [7] Attack NE, Sandy JR, Addy M. Periodontal and microbiological changes associated with the placement of orthodontic appliances. A review. *J Periodontol* 1996;67:78–85.
- [8] Attin R. Kariesprävention in der Kieferorthopädie. *Informationen Aus Orthod Kieferorthopädie* 2016;48:121–6.
- [9] Attin T, Buchalla W, Trett A, Hellwig E. Toothbrushing abrasion of polyacid modified composites in neutral and acidic buffer solutions. *J Prosthet Dent* 1998;80:148–50.
- [10] Axelsson P. Preventive dentistry program. Practical preventive dentistry: 15-year experience in Sweden. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1989;99:1045–51.
- [11] Azeem M, Ul W. Incidence of white spot lesions during orthodontic clear aligner therapy. *J World Fed Orthod* 2017;6:127–30.
- [12] Azinović Z, Keros J, Buković D, Azinović A. SEM analysis of tooth enamel. *Coll*

- Antropol 2003;27:381–6.
- [13] Bebbler L Van, Campbell PM, Honeyman AL, Spears R. Does the amount of filler content in sealants used to prevent decalcification on smooth enamel surfaces really matter ? Angle Orthod 2011;81:134–40.
- [14] Bechtold TE, Sobiegalla A, Markovic M, Berneburg M, Göz GR. In vivo effectiveness of enamel sealants around orthodontic brackets. J Orofac Orthop 2013;74:1–10.
- [15] Behnan SM, Arruda AO, González-Cabezas C, Sohn W, Peters MC. In-vitro evaluation of various treatments to prevent demineralization next to orthodontic brackets. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2010;138:712.e1-712.e7.
- [16] Bellini H, Arneberg P, von der Fehr F. Oral hygiene and caries. A review. Acta Odontol Scand 1981;39:257–65.
- [17] Bishara SE, Ostby AW. White Spot Lesions: Formation, Prevention, and Treatment. Semin Orthod 2008;14:174–82.
- [18] Bishara SE, Oonsombat C, Soliman MMA, Warren J. Effects of using a new protective sealant on the bond strength of orthodontic brackets. Angle Orthod 2005;75:243–6.
- [19] Bloom RH, Brown LR. A study of the effects of orthodontic appliances on the oral microbial flora. Orthod Appliances Oral Microb Flora 1964;17:658–67.
- [20] Bowden GHW. The Microbial Ecology of Dental Caries. Microb Ecol Health Dis 2000;12:138–48.
- [21] Boyd R, Rose C. Effect of rotary electric toothbrush versus manual toothbrush on decalcification during orthodontic treatment. AM J Orthod Dentofac Orthop 1994;450–6.
- [22] Boyde A. Scanning Electron Microscopy of Enamel Surface. Br Med Bull 1975;31:261–331.
- [23] Braem M, Lambrechts P, Vanherles G. Clinical relevance of laboratory fatigue studies. J Dent 1994;22:97–102.
- [24] Buddecke E. Biochemische Grundlagen der Zahnmedizin. De Gruyter Münster; 1981.

- [25] Bulletin Atlas Suntest. Atlas Material Testing Solutions. Gelnhausen: 1998.
- [26] Bundesrechnungshof. Jahresbericht 2017 Bemerkungen -Ergänzungsband Nr. 09 "Nutzung kieferorthopädischer Behandlung muss endlich erforscht werden." 2017.
- [27] Buonocore M. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials of enamel surfaces. J Dent Res 1955;849–53.
- [28] Buren JL, Staley RN, Wefel J, Qian F. Inhibition of enamel demineralization by an enamel sealant, Pro Seal: an in-vitro study. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2008;133:88–94.
- [29] Buschang PH, Chastain D, Keylor CL, Crosby D, Julien KC. Incidence of white spot lesions among patients treated with clear aligners and traditional braces. Angle Orthod 2019;89:359–64.
- [30] Cacciafesta V, Sfondrini MF, Tagliani P, Klersy C. In-vitro fluoride release rates from 9 orthodontic bonding adhesives. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2007;132:656–62.
- [31] Ceen RF, Gwinnett a J. White spot formation associated with sealants used in orthodontics. Pediatr Dent 1981;3:174–8.
- [32] Chapman J a, Roberts WE, Eckert GJ, Kula KS, González-Cabezas C. Risk factors for incidence and severity of white spot lesions during treatment with fixed orthodontic appliances. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2010;138:188–94.
- [33] Claudino D, Traebert J. Malocclusion, dental aesthetic self-perception and quality of life in a 18 to 21 year-old population: a cross section study. BMC Oral Health 2013;13:1–6.
- [34] Coceska E, Gjorgievska E, Coleman NJ, Gabric D, Slipper IJ, Stevanovic M, et al. Enamel alteration following tooth bleaching and remineralisation. J Microsc 2016;262:232–44.
- [35] Cohen WJ, Wiltshire WA, Hons B, Dawes C, Lavelle CLB. Long-term in vitro fluoride release and rerelease from orthodontic bonding materials containing fluoride. AM J Orthod Dentofac Orthop 2003;124:571–6.
- [36] Coordes SL, Jost-Brinkmann PG, Präger TM, Bartzela T, Visel D, Jäcker T, et

- al. A comparison of different sealants preventing demineralization around brackets. *J Orofac Orthop* 2018;79:49–56.
- [37] Corbett J a., Brown LR, Keene HJ, Horton IM. Comparison of *Streptococcus mutans* Concentrations in Non-banded and Banded Orthodontic Patients. *J Dent Res* 1981;60:1936–42.
- [38] Demito CF, Vivaldi-Rodrigues G, Ramos a L, Bowman SJ. The efficacy of a fluoride varnish in reducing enamel demineralization adjacent to orthodontic brackets: an in vitro study. *Orthod Craniofac Res* 2004;7:205–10.
- [39] DeWald J. The use of extracted teeth for in vitro bonding studies: a review of infection control considerations. *Dent Mater* 1997;13:74–81.
- [40] Diedrich P. Klinische Bruchhäufigkeit , Plaquebildung und Schmelzläsionen bei der Bracket-Adhäsivtechnik. *Fortschr Kieferorthop* 1981;42:195–208.
- [41] Diedrich P. Enamel alterations from bracket bonding and debonding: a study with the scanning electron microscope. *AM J Orthod* 1981;79:500–22.
- [42] Djamchidi C, Hartung C, Jost-Brinkmann P. Cleaning efficacy of superfloss, special-floss and satinfloss/megafloss in patients with brackets. *Orthodontics* 2004;1:33–41.
- [43] Dyer D, Addy M, Newcombe R. Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste. *J Clin Periodontal* 2000;27:99–103.
- [44] Eggert SC. Einfluss selbstadhäsiver Unterfüllungen auf die Dichtigkeit von Klasse-I-Füllungen. 2014.
- [45] Ehrenberg DS, Weiner S. Changes in marginal gap size of provisional resin crowns after occlusal loading and thermal cycling. *J Prosthet Dent* 2000;84:139–48.
- [46] Eliades T, Gioka C, Heim M, Eliades G, Makou M. Color stability of orthodontic adhesive resins. *Angle Orthod* 2004;74:391–3.
- [47] Emilson CG. Potential efficacy of chlorhexidine against *mutans streptococci* and human dental caries. *J Dent Res* 1994;73:682–91.
- [48] Enaia M, Bock N, Ruf S. White-spot lesions during multibracket appliance

- treatment: A challenge for clinical excellence. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011;140:17–24.
- [49] Engel S, Jost-Brinkmann P-G, Spors CK, Mohammadian S, Müller-Hartwich R. Abrasive effect of air-powder polishing on smooth surface sealants. *J Orofac Orthop* 2009;70:363–70.
- [50] Featherstone JDB, Glena R, Shariati M, Shields CP. Dependence of in vitro demineralization of apatite and remineralization of dental enamel on fluoride concentration. *J Dent Res* 1990;69:620–5.
- [51] Featherstone JDB. Prevention and reversal of dental caries: Role of low level fluoride. *Community Dent Oral Epidemiol* 1999;27:31–40.
- [52] Fejerskov O, Thylstrup A, Mjör I. Human oral embryology and histology. Copenhagen: 1986.
- [53] Ferrario VF, Sforza C, Zanotti G, Tartaglia GM. Maximal bite forces in healthy young adults as predicted by surface electromyography. *J Dent* 2004;32:451–7.
- [54] Fink D, Smith R. The duration of orthodontic treatment. *AM J Orthod Dentofac Orthop* 1992;102:45–51.
- [55] Fischer C, Lussi A, Hotz P. The cariostatic mechanisms of action of fluorides. A review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1995;105:311–317.
- [56] Fontijn-Tekamp FA, Slagter AP, Van Der Bilt A, Van 't Hof MA, Witter DJ, Kalk W, et al. Biting and chewing in overdentures, full dentures, and natural dentitions. *J Dent Res* 2000;79:1519–24.
- [57] Frankenberger R, García-Godoy F, Lohbauer U, Petschelt A, Krämer N. Evaluation of resin composite materials. Part I: In vitro investigations. *Am J Dent* 2005;18:23–7.
- [58] Frankenberger R, Krämer N, Petschelt A. Fatigue behaviour of different dentin adhesives. *Clin Oral Investig* 1999;3:11–7.
- [59] Frankenberger R, Strobel WO, Krämer N, Lohbauer U, Winterscheidt J, Winterscheidt B, et al. Evaluation of the Fatigue Behavior of the Resin-Dentin Bond with the Use of Different Methods. *J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater* 2003;67:712–21.

- [60] Frankenberger R, Tay FR. Self-etch vs etch-and-rinse adhesives: effect of thermo-mechanical fatigue loading on marginal quality of bonded resin composite restorations. *Dent Mater* 2005;21:397–412.
- [61] Frazier MC, Southard TE, Doster PM. Prevention of enamel demineralization during orthodontic treatment: an in vitro study using pit and fissure sealants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;110:459–65.
- [62] Gale M, Darvell B. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent* 1999;27:89–99.
- [63] Gandolfi MG, Chersoni S, Acquaviva GL, Piana G, Prati C, Mongiorgi R. Fluoride release and absorption at different pH from glass-ionomer cements. *Dent Mater* 2006;22:441–9.
- [64] Gerbo LR, Barnes CM, Leinfelder KF. Applications of the air-powder polisher in clinical orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1993;103:71–3.
- [65] Gibbons R, van Houte J. Bacterial adherence in oral microbial ecology. *Ann Rev Microbiol* 1975:19–44.
- [66] Gorelick L, Geiger a M, Gwinnett a J. Incidence of white spot formation after bonding and banding. *Am J Orthod* 1982;81:93–8.
- [67] Gorton J, Featherstone JDB. In vivo inhibition of demineralization around orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;123:10–4.
- [68] Gülzow H, Hellwig E, Hetzer G. Empfehlungen zur Kariesprophylaxe mit Fluoriden. *Dtsch Zahnärztl Z* 2000;55:523.
- [69] Gwinnett AJ. Acid etching for composite resins. *Dent Clin North AM* 1981;25.
- [70] Gwinnett A, Ceen R. Plaque distribution on bonded brackets: a scanning microscope study. *AM J Orthod* 1979;75:667–77.
- [71] Gwinnett AJ, Ph D. Microscopic evaluation of the thickness of sealants used in orthodontic bonding 1980.
- [72] Hadler-Olsen S, Sandvik K, El-Agroudi M a, Øgaard B. The incidence of caries and white spot lesions in orthodontically treated adolescents with a comprehensive caries prophylactic regimen--a prospective study. *Eur J Orthod* 2012;34:633–9.

- [73] Hammad SM, Knösel M. Wirksamkeit eines neuen Versieglers zur Prävention von White-Spot Läsionen während einer kieferorthopädischen Behandlung mit festsitzenden Apparaturen. J Orofac Orthop 2016;77:439–45.
- [74] Heidemann D, Klimek J, Hellwig E. Kariologie und Füllungstherapie. 4. Auflage. München-Wien-Baltimore: Urban&Schwarzenberg Verlag; 1999.
- [75] Heintze S. Individualprophylaxe bei Multiband-Patienten. Quintessenz 1994;24:245–52.
- [76] Heintze S, Miethke R-R. Kieferorthopädie und Kariesrisiko. Prakt Kieferorthopädie 1993;7:31-46.
- [77] Hellak A, Rusdea P, Schauseil M, Stein S, Korbmacher-Steiner HM. Scherhaftfestigkeit zweier selbststützender Bondingsysteme im Vergleich zu Transbond XT. J Orofac Orthop 2016;77:391–9.
- [78] Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 5. Auflage. Deutscher Zahnärzte Verlag Köln; 2009.
- [79] Hickman J, Millet D, Sander L, Brown E, Love J. Powered vs. manual tooth brushing in fixed appliance patients: a short term randomized clinical trial. Angle Orthod 2002;72:135–40.
- [80] Hu W, Featherstone JDB. Prevention of enamel demineralization: an in-vitro study using light-cured filled sealant. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2005;128:592–600.
- [81] Huber S, Vernino A, Nanda R. Professional prophylaxis and its effect on the periodontium of full-banded orthodontic patients. AM J Orthod Dentofac Orthop 1987;91:321–7.
- [82] Huser MC, Baehni PC, Lang R. Effects of orthodontic bands on microbiologic and clinical parameters. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1990;97:213–8.
- [83] Imazato S, Kuramoto A, Takahashi Y, Ebisu S, Peters MC. In vitro antibacterial effects of the dentin primer of Clearfil Protect Bond. Dent Mater 2006;22:527–32.
- [84] Imfeld T. In vitro evaluation of the mechanical effects of sensitive toothpastes of the Swiss market. Schweiz Monatsschr Zahnmed 2002;112:104–8.

- [85] International Standards Organization. Guidance on testing of adhesion to tooth structure. 1994.
- [86] Jackson C. Comparison between electric toothbrushing and manual toothbrushing, with and without oral irrigation, for oral hygiene of orthodontic patients. AM J Orthod Dentofac Orthop 1991;99:15–20.
- [87] Joseph VP, Rossouw PE, Basson NJ. Some " sealants " seal. A scanning electron microscopy (SEM) investigation. J Orthod Dentofac Orthop 1994;105:362–8.
- [88] Jost-Brinkmann P, Miethke R-R, Gehrke T. Festsitzende kieferorthopädische Apparaturen und die Entwicklung von Karies, insbesondere Initialläsionen. Inf Orthod Kieferorthopädie 1996;28:327–36.
- [89] Jost-Brinkmann P, Nedwed V, Peng C-L, Yoshida N. Professionelle Zahnreinigung . Pulver-Wasser-Strahlgeräte in der Orthodontie. Kieferorthop J 2000;2:23–30.
- [90] Julien KC, Buschang PH, Campbell PM. Prevalence of white spot lesion formation during orthodontic treatment. Angle Orthod 2013;83:641–7.
- [91] Khalefa M, Finke C, Jost-Brinkmann P-G. Effects of air-polishing devices with different abrasives on bovine primary and second teeth and deciduous human teeth. J Orofac Orthop 2013;74:370–80.
- [92] Klimek J, Prinz P, Hellwig E, Ahrens G. Effect of a preventive program based on professional toothcleaning and fluoride application on caries and gingivitis. Community Dent Oral Epidemiol 1985;13:295–8.
- [93] Knösel M, Klang E, Helms H-J, Jilek T. Vollständig individuelle linguale Apparaturen vermindern das Schmelzentkalkungsrisiko bei einer Multibracketbehandlung um ein Vielfaches. Informationen Aus Orthod Kieferorthopädie 2015;47:149–57.
- [94] Korbmacher-Steiner HM, Schilling AF, Huck LG, Kahl-Nieke B, Amling M. Laboratory evaluation of toothbrush/toothpaste abrasion resistance after smooth enamel surface sealing. Clin Oral Investig 2013;17:765–74.
- [95] Kossack C, Jost-Brinkmann P. Plaque and gingivitis reduction in patients undergoing orthodontic treatment with fixed appliances- comparison of

- toothbrushes and interdental cleaning aids. A 6-month clinical single-blind trial. *J Orofac Orthop* 2005;66:20–38.
- [96] Kronenberg O, Lussi A, Ruf S. Preventive effect of ozone on the development of white spot lesions during multibracket appliance therapy. *Angle Orthod* 2009;79:64–9.
- [97] Kruskal W, Wallis WA. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Am Stat Assoc* 1952;47:583–621.
- [98] Lehmann K., Hellwig E. *Zahnärztliche Propädeutik*. Urban+Fischer Verlag München; 2005.
- [99] Li Q, Jepsen S, Albers HK, Eberhard J. Flowable materials as an intermediate layer could improve the marginal and internal adaptation of composite restorations in Class-V-cavities. *Dent Mater* 2006;22:250–7.
- [100] Lobo MM, Pecharki GD, Tengan C, da Silva DD, da Tagliaferro EPS, Napimoga MH. Fluoride-releasing capacity and cariostatic effect provided by sealants. *J Oral Sci* 2005;47:35–41.
- [101] Lopes MB, Consani S. Comparative study of the dental substrate used in shear bond strength tests Estudo comparativo do tipo de substrato dental utilizado em testes de resistência de união ao cisalhamento. *Pesqui Odontol Bras* 2003;17:171–5.
- [102] Lovrov S, Hertrich K, Hirschfelder U. Enamel Demineralization during Fixed Orthodontic Treatment - Incidence and Correlation to Various Oral-hygiene Parameters. *J Orofac Orthop* 2007;68:353–63.
- [103] Lundström F, Krasse B. Streptococcus mutans and lactobacilli frequency in orthodontic patients; the effect of chlorhexidine treatments. *Eur J Orthod* 1987;9:109–16.
- [104] Madléna M, Vitalyos G, Márton S, Nagy G. Effect of chlorhexidine varnish on bacterial levels in plaque and saliva during orthodontic treatment. *J Clin Dent* 2000;11:42–6.
- [105] Maltz M, Zickert I, Krasse B. Effect of intensive treatment with chlorhexidine on number of streptococcus mutans in saliva. *Scand J Dent Res* 1981;89:445–9.

- [106] Mann HB, Whitney DR. On a Test of Whether One or Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Ann Math Stat* 1947;18:50–60.
- [107] Marsh P, Martin M V. *Oral Microbiology*. 4. Ausgabe. Oxford: Reed educational and Professional Publishing Ltd; 2003.
- [108] Marshall GW, Olson LM, Lee CV. SEM Investigation of the Variability of Enamel Surfaces After Simulated Clinical Acid Etching for Pit and Fissure Sealants. *J Dent Res* 1975;54:1222–31.
- [109] Mathew M, Parameswaran Nair EK, Krishnan K. Bonding agent is a decisive factor in determining the marginal leakage of dental composites subjected to thermal cycling: an in vitro study. *J Oral Rehabil* 2001;28:68–77.
- [110] McNeill CJ, Wiltshire W a, Dawes C, Lavelle CL. Fluoride release from new light-cured orthodontic bonding agents. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001;120:392–7.
- [111] Mehl C, Scheibner S, Ludwig K, Kern M. Wear of composite resin veneering materials and enamel in a chewing simulator. *Dent Mater* 2007;23:1382–9.
- [112] Meller C, Schott T. Integrity testing of a smooth surface resin sealant around orthodontic brackets using a new Fluorescence-aided Identification Technique (FIT). *Angle Orthod* 2018;88:765–70.
- [113] Melo MAS, Morais WA, Passos VF, Lima JPM, Rodrigues LKA. Fluoride releasing and enamel demineralization around orthodontic brackets by fluoride-releasing composite containing nanoparticles. *Clin Oral Investig* 2014;18:1343–50.
- [114] Miller W. The micro-organisms of the human mouth; the local and general diseases which are caused by them. Leipzig: Thieme Verlag; 1899.
- [115] Mitchell L. Decalcification during orthodontic treatment with fixed appliances-an overview. *Br J Orthod* 1992;19:199–205.
- [116] Mizrahi E. Enamel demineralization following orthodontic treatment. *AM J Orthod* 1982;82:62–7.
- [117] Mjör IA, Fejerskov O. *Histology of the human tooth*. Copenhagen: 1979.
- [118] Moreau JL, Weir MD, Giuseppetti AA, Chow LC, Antonucci JM, Xu HHK. Long-

- term mechanical durability of dental nanocomposites containing amorphous calcium phosphate nanoparticles. *J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater* 2012;100 B:1264–73.
- [119] Morresi AL, D’Amario M, Capogreco M, Gatto R, Marzo G, D’Arcangelo C, et al. Thermal cycling for restorative materials: Does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *J Mech Behav Biomed Mater* 2014;29:295–308.
- [120] Nakamichi I, Iwaku M, Fusayama T. Bovine Teeth as Possible Substitutes in the Adhesion Test. *J Dent Res* 1983;62:1076–81.
- [121] Nedwed V. Untersuchungen zu den Wirkungen eines Pulver-Wasser-Strahlgerätes auf Zahnschmelz und verschiedene Füllungs- und Befestigungsmaterialien in der Kieferorthopädie. Eine in-vitro Studie zum Prophylflex. Charité Berlin; 2003.
- [122] Newburn E. Teaching and testing on caries and preventing dentistry. *J Prev Dent* 1989;1:28–34.
- [123] Nogales CG, Ferrari PH, Kantorovich EO, Lage-Marques JL. Ozone therapy in medicine and dentistry. *J Contemp Dent Pract* 2008;9:75–84.
- [124] O’Reilly MM, Featherstone JD. Demineralization and remineralization around orthodontic appliances: an in vivo study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987;92:33–40.
- [125] Ogaard B. Incidence of filled surfaces from 10-18 years of age in an orthodontically treated and untreated group in Norway. *Eur J Orthod* 1989;11:116–9.
- [126] Øgaard B, Larsson E, Henriksson T, Birkhed D, Bishara SE. Effects of combined application of antimicrobial and fluoride varnishes in orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001;120:28–35.
- [127] Oogard B, Rolla G, Arends J. Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 1. Lesion deveolpment. *AM J Orthod Dentofac Orthop* 1988;94:68–73.
- [128] Parry J, Harrington E, Rees GD, McNab R, Smith AJ. Control of brushing variables for the in vitro assessment of toothpaste abrasivity using a novel

- laboratory model. *J Dent* 2008;36:117–24.
- [129] Paschos E, Kleinschrodt T, Clementino-Luedemann T, Huth KC, Hickel R, Kunzelmann K-H, et al. Effect of different bonding agents on prevention of enamel demineralization around orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:603–12.
- [130] Premaraj TS, Rohani N, Covey D, Premaraj S. In vitro evaluation of surface properties of Pro Seal ® and Opal ® Seal TM in preventing white spot lesions. *Orthod Craniofac Res* 2017;20:134–8.
- [131] Ratto R, Moraes D. In vitro toothbrushing abrasion of dental resin composites : packable, microhybrid, nanohybrid and microfilled materials. *Braz Oral Res* 2008;22:112–8.
- [132] Richter AE, Arruda AO, Peters MC, Sohn W. Incidence of caries lesions among patients treated with comprehensive orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2011;139:657–64.
- [133] Roggendorf MJ, Krämer N, Appelt A, Naumann M, Frankenberger R. Marginal quality of flowable 4-mm base vs. conventionally layered resin composite. *J Dent* 2011;39:643–7.
- [134] Rosenbloom RG, Tinanoff N. Salivary *Streptococcus mutans* levels in patients before, during, and after orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;100:35–7.
- [135] Schmid-Schwap M, Graf A, Preinerstorfer A, Watts DC, Piehslinger E, Schedle A. Microleakage after thermocycling of cemented crowns--a meta-analysis. *Dent Mater* 2011;27:855–69.
- [136] Schroeder HE. *Orale Strukturbiologie* 2000:55–79.
- [137] Seeling S, Prütz F. Inanspruchnahme kieferorthopädischer Behandlung durch Kinder und Jugendliche in Deutschland - Querschnittergebnisse aus KiGGS Welle 2 und Trends. *J Heal Monit* 2018;3 (4):78–85.
- [138] Shellis RP, Wilson RM. Apparent solubility distributions of hydroxyapatite and enamel apatite. *J Coll Interf Sci* 2004;278:325–32.
- [139] Soliman MM, Bishara SE, Wefel J, Heilman J, Warren JJ. Fluoride release rate from an orthodontic sealant and its clinical implications. *Angle Orthod*

2006;76:282–8.

- [140] Sonesson M, Twetman S, Bondemark L. Effectiveness of high-fluoride toothpaste on enamel demineralization during orthodontic treatment- a multicenter randomized controlled trial. *Eur J Orthod* 2014;36:678–82.
- [141] Sonis A, Snell W. An evaluation of a fluoride releasing, visible light-activated bonding system for orthodontic bracket placement. *AM J Orthod Dentofac Orthop* 1989;95:306–11.
- [142] Stecksén-Blicks C, Renfors G, Oscarson ND, Bergstrand F, Twetman S. Caries-preventive effectiveness of a fluoride varnish: a randomized controlled trial in adolescents with fixed orthodontic appliances. *Caries Res* 2007;41:455–9.
- [143] Stewardson D., Shortall AC, Marquis PM. The effect of clinically relevant thermocycling on the flexural properties of endodontic post materials. *J Dent* 2010;38:437–42.
- [144] Strunz H, Nickel EH. Strunz Mineralogical Tables. Chemical-structural Mineral Classification System. 9th ed. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller); 2001.
- [145] Suzuki T, Kyoizumi H, Finger WJ, Kanehira M, Endo T, Utterodt A, et al. Resistance of nanofill and nanohybrid resin composites to toothbrush abrasion with calcium carbonate slurry. *Dent Mater J* 2009;28:708–16.
- [146] Thienpont V, Dermaut L, Van Maele G. Comparative study of 2 electric and 2 manual toothbrushes in patients with fixed orthodontic appliances. *AM J Orthod Dentofac Orthop* 2001;120:353–60.
- [147] Tosun S. Effect of Chitosan on Mineral Content of Human Tooth After Bleaching: An SEM-EDX Study. *J Adv Oral Res* 2019;10:161–4.
- [148] van der Veen MH, Attin R, Schwestka-Polly R, Wiechmann D. Caries outcomes after orthodontic treatment with fixed appliances: do lingual brackets make a difference? *Eur J Oral Sci* 2010;118:298–303.
- [149] Weaks LM, Lescher NB, Barnes CM, Holroyd S V. Clinical evaluation of the Prophy-Jet as an instrument for routine removal of tooth stain and plaque. *J Periodontol* 1984;55:486–8.

- [150] Wiechmann D, Klang E, Helms HJ, Knösel M. Lingual appliances reduce the incidence of white spot lesions during orthodontic multibracket treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2015;148:414–22.
- [151] Wilcoxon D, Ackermann R, Killoy W, Love J, Sakumara J, Tira D. The effectiveness of a counterrotational-action power toothbrush on plaque control in orthodontic patients. *AM J Orthod Dentofac Orthop* 1991;99:7–14.
- [152] World Medical Association W. Deklaration von Helsinki - ethische Grundsätze für die medizinische Forschung am Menschen. 2013.
- [153] Yu H, Wegehaupt FJ, Wiegand A, Roos M, Attin T, Buchalla W. Erosion and abrasion of tooth-colored restorative materials and human enamel. *J Dent* 2009;37:913–22.
- [154] Zachrisson B, Heimgard E, Ruyter I, Mjor I. Problems with sealants for bracket bonding. *AM J Orthod* 1979;75:641–9.
- [155] Zimmer B. Systematic Decalcification Prophylaxis during Treatment with Fixed Appliances Systematische Entkalkungsprophylaxe bei der Multibandbehandlung. *J Orofac Orthop* 1999;60:205–14.

10. Anhang

10.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemischer Aufbau des Zahnschmelzes [24].....	8
Tabelle 2: Verwendete Produkte und deren Inhaltsstoffe nach Herstellerangaben ..	22
Tabelle 3: Herstellung der einzelnen Versuchsproben	24
Tabelle 4: Versiegler nach Belastung im Vergleich zur unbelasteten Referenzprobe mit Mittelwert (M), Standardabweichung (SD)	35
Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Versiegler (Mass%) und der Kontrollgruppe nach der thermomechanischen Belastung	36

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chronologischer Ablauf der Studie	21
Abbildung 2: Zahnproben vor der Phosphorsäurekonditionierung.....	23
Abbildung 3: Positionierung der Brackets.....	25
Abbildung 4: Testproben vor der definitiven Befestigung auf einer Bausteinplatte ...	26
Abbildung 5: Proben im CS-4 Kausimulator	27
Abbildung 6: Eingesetzte Probe in Testkammer des Kausimulators	28
Abbildung 7: Thermocycling Apparatur.....	28
Abbildung 8: Proben in der Belichtungskammer des CPS plus Gerätes	29
Abbildung 9: Versuchsaufbau der Pulver-Wasserstrahl Testung.....	30
Abbildung 10: Düse der PROPHYpearls™ Apparatur in 5mm Abstand zur Zahnoberfläche	31
Abbildung 11: Mitsubishi RV-E4NM Putzsimulator	32
Abbildung 12: Aufnahme der unversiegelten Labialfläche. Wachstumslinien und Rissbildungen erkennbar. Probe A5, 30x	39
Abbildung 13: Detailaufnahme. Abgeflachte Schmelzprismen. Probe A5, 1000x.....	39
Abbildung 14: Ungleichmäßige, raue Oberfläche der unversiegelten Probe A15, 32x	39
Abbildung 15: Detailaufnahme. Prismenstrukturen erkennbar. Vereinzelt Bakterien und Schmutzpartikel. Probe A15, 1000x	39
Abbildung 16: Ausgeprägte Rissbildungen auf der unversiegelten Labialfläche. Probe A19, 30x	39

Abbildung 17: Detailaufnahme. Schmelzprismen teilweise erhalten. Probe A19, 1000x.....	39
Abbildung 18: Referenzprobe Pro Seal®. Zentraler Lufteinschluss. Freiliegender Schmelz unterhalb der Bracketbasis, 30x	41
Abbildung 19: regelmäßige dunkle Schicht mit bis zu etwa 10 µm großen Füllkörpern. Pro Seal® Referenzprobe, 750x.....	41
Abbildung 20: Lücken in Sealerschicht, Probe B7, 31x	41
Abbildung 21: Zentral freiliegender Zahnschmelz, Prismenstrukturen, umgeben von Versiegelung, Probe B7, 1000x.....	41
Abbildung 22: Intakte Versiegelung; Freiliegender Zahnschmelzbereich rechts Probe B20, 30x	41
Abbildung 23: Intakte Lackschicht mit Vertiefungen, Probe B20, 1000x.....	41
Abbildung 24: Referenzprobe Light Bond TM , 30x.....	43
Abbildung 25: Referenzprobe Light Bond TM , Einziehungen in Oberfläche. 1000x...	43
Abbildung 26: Diverse Schmelzrisse, sowie zentral, kleinflächig versiegelter Bereich. Probe C14, 30x	43
Abbildung 27: Freiliegende, wabenförmige Schmelzprismen, Probe C14, 1000x	43
Abbildung 28: Freiliegende, säurekonditionierte Schmelzoberfläche, tiefe Rissbildung. Probe C18, 30x	43
Abbildung 29: Tiefer Riss in säurekonditionierten Schmelz, Probe C18, 1000x	43
Abbildung 30: Referenzprobe Clearfil TM Protect Bond, 30x	45
Abbildung 31: spongiöser Aufbau des Clearfil TM Protect Bond. Referenzprobe, 1000x	45
Abbildung 32: Oberer, linker Bereich mit zusammenhängender Versiegelung. Darunter freiliegender Schmelz mit Vertiefungen. Probe D7, 30x	45
Abbildung 33: Übergangsbereich von säurekonditioniertem Schmelz links in abgeflachten Schmelz rechts. Probe D7, 1000x.....	45
Abbildung 34: Freiliegende Schmelzoberfläche mit Einkerbungen oben, Rissbildung und Versiegelung am unteren Bildrand, Probe D15, 31x.....	45
Abbildung 35: Freiliegende Schmelzoberfläche mit deutlicher Wabenstruktur. Probe D15, 1000x	45
Abbildung 36: Unregelmäßige Bedeckung der Oberfläche. Ortho Solo TM Referenzprobe, 31x	47

Abbildung 37: Leicht schwammartige Struktur der Ortho Solo TM Referenzprobe, 1000x.....	47
Abbildung 38: Versiegelerfreie Zahnoberfläche mit typischen Wachstumslinien. Probe E1, 30x	47
Abbildung 39: Freiliegender Zahnschmelz, abgerundet-oktaedrischen Schmelzprismen. Probe E1, 1000x	47
Abbildung 40: Wachstumslinien und diverse Schmelzrisse. Probe E14, 30x	47
Abbildung 41: Schmelzoberfläche mit teilweise erkennbaren Schmelzprismen. Probe E14, 1000x	47
Abbildung 42: Streifig- unregelmäßige Versiegelung der Oberfläche. Markanter Schmelzriss. Protecto® CaF ₂ Nano Referenzprobe, 30x	49
Abbildung 43: Versiegelte Zahnfläche und Füllkörper im oberen Bereich, darunter Freiliegender Zahnschmelz, Protecto® CaF ₂ NanoReferenzprobe, 1000x.....	49
Abbildung 44: Markante Abrasionserscheinungen und Rissbildung auf freiliegendem Schmelz. Probe F5, 32x	49
Abbildung 45: Zahnoberfläche mit abgerundeten Schmelzprismen. Probe F5, 1000x	49
Abbildung 46: Schmelzfrakturen auf freiliegender Oberfläche. Probe F15, 30x	49
Abbildung 47: Glatte Zahnoberfläche, Kratzer und Abrasionserscheinungen. Probe F15, 1000x	49
Abbildung 48: Pro Seal® nach PWS Testung, 30x.....	50
Abbildung 49: Pro Seal® nach PWS Testung, 849x.....	50

10.3. Tabellarischer Lebenslauf

10.4 Verzeichnis der akademischen Lehrer

Folgende Damen und Herren waren meine akademischen Lehrer an der Philipps-Universität Marburg:

Adamkiewicz, Arweiler, Auschill, Braun, Cetin, Czubayko, Draenert, Feuser, Frankenberger, Gente, Gloerfeld, Hellak, Himpel, Höffken, Jablonski-Momeni, Korbmacher-Steiner, Kroh, Lamp, Lill, Lotzmann, Mittag, Moll, Neff, Neumüller, Nonnenmacher, Oliver, Pieper, Ramaswamy, Richter, Seitz, Steininger, Teymoortash, Weber, Weihe, Westermann, Wilhelm, Wrocklage.

10.5 Ehrenwörtliche Erklärung

10.6 Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. med. dent. Korbmacher-Steiner für die Überlassung des Themas und das damit verbundene Vertrauen bedanken.

Einen besonderen Dank möchte ich an Herrn Dr. Andreas Hellak aussprechen: Die konstruktive Hilfestellung und die ausführliche Beratung waren eine wertvolle Stütze meiner Arbeit.

Ich bedanke mich bei Dr. Andreas Schäfer und seinem Team der Firma Nanoanalytics in Münster für die Möglichkeit der Anfertigung rasterelektronischer Aufnahmen und der Unterstützung hierbei.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. M. Kaup aus der Abteilung für Zahnerhaltung der Universität Münster für die Unterstützung bei der Durchführung der Testung zur Zahnbürstenabrasion sowie bei Dr. K. Ruppert für die Möglichkeit der Alterungstestung in den Räumlichkeiten der Fa. Heraeus-Kulzer in Hanau.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. dent. Frankenberger und insbesondere seiner Mitarbeiterin Frau Dr. Vera Hartmann aus der Abteilung für Zahnerhaltung der Philipps-Universität Marburg für die Erläuterungen und Hilfestellungen bei der Durchführung der Kausimulation.

Der größte Dank geht an meine Familie, insbesondere an meine Eltern. Ohne eure Unterstützung wäre mein Studium, meine Fachzahnarztausbildung und diese Arbeit nie möglich gewesen.

Die Arbeit sei euch -Papa, Mama, Sarah, Anna und Oma- gewidmet.